

INVESTIGACIÓN SOBRE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO 100% RECICLADAS CON ADICIÓN
DE RESIDUOS SÓLIDOS

TESIS DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL

ANDREA PAOLA CASTRO CABEZA
INGENIERA CIVIL

DIRECTOR
GILBERTO MARTÍNEZ ARGUELLES. I.C., PHD
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL DE LA UNIVERSIDAD DEL NORTE



FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DEL NORTE
Barranquilla, mayo de 2018

Dedicatoria

Esta tesis quiero dedicarla a Dios, a mi familia: mis padres: Doris y César y mi hermana Ginna. Me han hecho creer que, con disciplina y constancia, todo es posible. Sin su amor y apoyo, no sería lo que soy hoy.

Agradezco al Dr. Gilberto Martínez, mi tutor, por la confianza depositada y por su apoyo en la obtención de todos y cada uno de los objetivos de esta tesis.

A mis amigos, en especial Miye Chávez, que siempre ha estado cerca, en este camino con imprevistos, miedos, sacrificios y alegrías, por su apoyo incondicional, gracias infinitas.

Contenido

Dedicatoria	2
Listado de Figuras	8
Listado de Tablas	13
Nomenclatura utilizada	14
Resumen	15
Abstract	16
1. Introducción	18
1.1. Antecedentes	19
1.2. Definición del problema y objetivos de la investigación	20
1.3. Estructura de la Tesis	22
2. Revisión de la Literatura: Estado del Arte	23
2.1. Caracterización del RAP	24
2.2. Selección del tipo de agente reciclador	25
Clasificación de las emulsiones asfálticas	27
2.3. Estimación de la demanda de agente reciclador: contenido óptimo de fluidos	30
2.3.1. Método Marshall Modificado	31
2.4. Adición de llenantes activos a la mezcla	31
2.5. Fabricación de las mezclas	32
2.5.1. Compactación	33
2.5.2. Curado	34
2.6. Criterios de desempeño de las mezclas recicladas en frío	35
2.6.1. Gravedad específica aparente y Gravedad específica Bulk	37
2.6.2. Contenido de Vacíos	37
2.6.3. Módulos de Rigidez	37
2.6.4. Resistencia a la deformación Permanente: Creep	38
2.6.5. Resistencia a la Fatiga o Carga repetida	39
2.7. Normativa Colombiana	39

2.7.1.	RECICLADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO EN LUGAR EMPLEANDO LIGANTES BITUMINOSOS Art. 461 – 13.....	40
2.7.2.	Reciclaje de pavimento asfáltico en el sitio con emulsión asfáltica -IDU.....	40
2.8.	Residuos Sólidos en Mezclas asfálticas	41
2.8.1.	Caucho de llanta en mezclas asfálticas	41
2.8.2.	Escorias de acero en mezclas asfálticas	43
2.9.	Beneficios Ambientales de las mezclas con adición de residuos sólidos.....	44
2.9.1.	PaLATE	45
3.	Materiales y Caracterización de los Materiales	46
3.1.	RAP Pavimento asfáltico reciclado	46
3.1.1.	Granulometría del RAP INV E 213-13	<u>4847</u>
3.1.2.	Evaluación del contenido de asfalto en el RAP: INV E 732-13.....	49
3.1.3.	Gravedad específica (SH) Secado al horno, en condición saturada y superficialmente seca SSS y gravedad específica aparente	<u>5049</u>
3.2.	Emulsión asfáltica.....	51
3.2.1.	Residuo por evaporación de la emulsión asfáltica INV E 771- 13	52
3.2.2.	Tamizado de la emulsión INV E 765-13	<u>5352</u>
3.2.3.	Potencial de hidrógeno INV E 768-13	53
3.2.4.	Sedimentación a 5 días INV E 764-13	<u>5453</u>
3.2.5.	Índice de Penetración del asfalto residual de la emulsión.....	<u>5554</u>
	Penetración INV E 706-13	<u>5655</u>
	Punto de ablandamiento (aparato de anillo y bola) I.N.V. E – 712 – 07.....	<u>5756</u>
3.3.	Caucho de llanta CR.....	<u>5857</u>
	Granulometría y composición química del caucho de llanta	<u>5958</u>
3.4.	Calamina CA	<u>6059</u>
	Granulometría y composición química de la calamina.....	<u>6160</u>
4.	Programa Experimental.....	<u>6261</u>
4.1.	Protocolo de fabricación de los especímenes.....	<u>6665</u>
4.1.1.	Procedimiento de Mezclado.....	<u>6766</u>
4.1.2.	Procedimiento de Compactación	<u>6867</u>
4.1.2.1.	Compactación Marshall.....	<u>6968</u>

4.1.2.2.	Compactación Giratoria.....	<u>7069</u>
4.1.3.	Procedimiento de Curado	<u>7271</u>
4.2.	Caracterización Volumétrica.....	<u>7473</u>
4.2.1.	Gravedad específica máxima teórica a 25°C.....	<u>7473</u>
4.2.2.	Gravedad específica bulk	<u>7574</u>
4.2.3.	Gravedad específica aparente.....	<u>7574</u>
4.2.4.	Contenido de Vacíos llenos de aire	<u>7574</u>
4.3.	Ensayos De rigidez	<u>7675</u>
4.3.1.	Módulo de Rigidez en máquina de ensayos.....	<u>7675</u>
4.3.1.1.	Curvas Maestras	<u>8079</u>
4.3.2.	Resistencia a la deformación permanente: Creep	<u>8281</u>
4.4.	Resistencia a la tracción indirecta y Susceptibilidad a la humedad	<u>8584</u>
4.4.1.	Ensayo de Resistencia a la tracción indirecta.....	<u>8685</u>
4.4.2.	Susceptibilidad al daño por humedad.....	<u>8887</u>
5.	Diseño de mezcla y descripción de los ensayos	<u>8988</u>
5.1.	Mezcla de Diseño.....	<u>8988</u>
5.1.1.	Ajuste de la granulometría de la mezcla	<u>8988</u>
5.1.2.	Demanda teórica de asfalto residual.....	<u>9391</u>
5.1.3.	Contenido óptimo de agua.....	<u>9392</u>
5.1.4.	Contenido óptimo de emulsión	<u>9493</u>
5.1.5.	Resultados de la Optimización del contenido de la emulsión	<u>9594</u>
5.1.5.1.	Características Volumétricas.....	<u>9594</u>
5.1.5.2.	Módulo de rigidez	<u>9796</u>
	Módulo de Rigidez a 5°C.....	<u>9796</u>
	Módulo de Rigidez a 25°C.....	<u>9897</u>
	Módulo de Rigidez a 40°C.....	<u>9998</u>
	Curvas maestras para mezclas para optimización de la emulsión.....	<u>101400</u>
5.1.5.3.	Resistencia a la tracción indirecta.....	<u>101400</u>
5.1.6.	Escogencia del óptimo contenido de emulsión	<u>102401</u>
6.	Resultados y Análisis de Resultados	<u>104403</u>
6.1.	Gravedad específica máxima de la mezcla	<u>104403</u>

6.2.	Gravedad específica bulk de los especímenes Gmb	<u>105104</u>
6.3.	Gravedad específica aparente	<u>107106</u>
6.4.	Contenido de Vacíos	<u>109108</u>
6.5.	Ensayos dinámicos	<u>111110</u>
6.5.1.	Módulo de Rigidez	<u>111110</u>
6.5.1.1.	Efecto del Caucho en el Módulo de Rigidez - Compactación tipo Marshall	<u>111110</u>
6.5.1.2.	Efecto del Caucho en el Módulo de Rigidez - Compactación tipo Giratoria	<u>112111</u>
6.5.1.3.	Efecto de la calamina en los módulos de rigidez	<u>114113</u>
6.5.2.	Curvas Maestras	<u>115114</u>
6.5.2.1.	Curvas Maestras para mezclas con caucho - Compactación tipo Marshall	<u>115114</u>
6.5.2.2.	Curvas Maestras, mezclas con caucho - Compactación tipo Giratoria	<u>117116</u>
6.5.2.3.	Curvas Maestras, mezclas con calamina	<u>118117</u>
6.5.3.	Resistencia a la deformación permanente: Creep de rigidez de rigidez.....	<u>121120</u>
6.6.	Resistencia a la tracción indirecta.....	<u>123122</u>
6.6.1.	Resistencia a la tracción indirecta en mezclas con caucho - Compactación Marshall..	<u>123122</u>
6.6.2.	Resistencia a la tracción indirecta en mezclas con caucho- Compactación Giratoria ...	<u>124123</u>
6.6.3.	Resistencia a la tracción indirecta en mezclas con calamina	<u>125124</u>
7.	LCA: Caso de Estudio	<u>127126</u>
7.1.	Descripción del caso	<u>127126</u>
7.2.	Metodología.....	<u>128127</u>
7.2.1.	Unidad funcional	<u>128127</u>
7.3.	Resultados software PaLATE.....	<u>129128</u>
7.4.	Análisis Comparativo por tipo de las mezclas.....	<u>129128</u>
8.	Conclusiones y recomendaciones para investigaciones futuras	<u>133132</u>
9.	Bibliografía	<u>137136</u>
10.	Anexos.....	<u>146145</u>
10.1.	Tablas Anovas- Gravedad específica máxima.....	<u>146145</u>
10.1.1.	Gravedad específica bulk - compactación Marshall	<u>147146</u>
10.1.2.	Gravedad específica bulk - compactación Giratoria	<u>147146</u>
10.1.3.	Densidad versus número de giros para las diferentes mezclas compactadas en Compactador Giratorio.....	<u>148147</u>

10.2.	Ficha Técnica de la emulsión utilizada. Fuente MPI Ltda.	<u>153152</u>
10.3.	Ficha Técnica Calamina	<u>154153</u>
10.4.	Módulos de Rigidez en mezclas con Caucho. Compactación Marshall	<u>155154</u>
10.5.	Módulos de Rigidez en mezclas con Caucho. Compactación Giratoria	<u>156155</u>
10.6.	Módulos de Rigidez en mezclas con Calamina.	<u>157156</u>
10.7.	Resultados Ensayo de Creep De rigidez De rigidez	<u>159158</u>
	<u>159158</u>
	<u>159158</u>
	<u>159158</u>
	<u>159158</u>

Listado de Figuras

Fig 2.2-1. Tipos de emulsión. a) O/W b) W/O c) W/O/W. Fuente: (James, 2006)	25
Fig 2.8-1. Método en seco para mezclas asfálticas con caucho. Fuente: Hassan et al., 2014	42
Fig 3.1-1. Pavimento asfáltico reciclado, subdividido en función de su tamaño..... ¡Error! Marcador no definido.46	
Fig 3.1-2. Ubicación del punto fresado de la circunvalar con carrera 27, (Google Maps, 2015). ¡Error! Marcador no definido.47	
Fig 3.1-3. Granulometría RAP original.	48
Fig 3.1-4. Granulometría del RAP dividido en fracciones.	4948
Fig 3.1-5. RAP en el equipo centrífuga para extracción del asfalto adherido.	5049
Fig 3.1-6. Picnómetro con RAP fino, para ensayo de gravedad específica y fracción gruesa de RAP en condición SSD para ensayo de gravedad específica. ¡Error! Marcador no definido.50	
Fig 3.2-1. Emulsión asfáltica añadida a la mezcla	5251
Fig 3.2-2. Vaso de precipitado con emulsión para evaporar en horno a 163°C.	5352
Fig 3.2-3. Electrodo de pHmetro sumergido en beaker con emulsión para la medición del potencial de hidrógeno.....	5453
Fig 3.2-4. Probeta 1 de 3 de ensayo de sedimentación a 5 días.	5554
Fig 3.2-5 Ensayo de penetración al asfalto residuo de la emulsión.	5655
Fig 3.2-6. Ensayo de punto de ablandamiento al asfalto residuo de la emulsión.....	5756
Fig 3.3-1. Caucho de llanta.	5857
Fig 3.3-2. Granulometría del caucho de llanta.....	5958
Fig 3.3-3. Imagen del caucho de llanta en microscopía de barrido electrónico y composición química elemental.....	6059
Fig 3.4-1. Apariencia de la calamina microscopio óptico 20X.	6059
Fig 3.4-2. Granulometría de la Calamina.....	6160
Fig 3.4-3. Imagen del caucho de llanta en microscopía de barrido electrónico y composición química elemental.....	6160
Fig 4.1-1 Diagrama de flujo con procedimiento de fabricación de los especímenes en laboratorio. ...	6665
Fig 4.1-2 Procedimiento de mezclado.	6766
Fig 4.1-3. Mezcladora planetaria con capacidad de 10L.....	6867
Fig 4.1-4 Compactador Marshall y molde de compactación previo a la compactación.	6968
Fig 4.1-5 Extractor de briquetas Marshall.	7069
Fig 4.1-6 Compactador giratorio y espécimen recién compactado.....	7170
Fig 4.1-7. a). Briquetas recién compactadas en compactador giratorio, b) Briquetas a las 3 horas de compactadas y c) luego de 24 horas de fabricación.	7271
Fig 4.1-8. Briquetas en estado seco, luego del período de curado de 72h a 40°C.	7372
Fig 4.2-1 Equipo Rice.....	7473
Fig 4.3-1. Máquina de ensayos dinámicos.....	7675
Fig 4.3-2. Montaje Ensayo de Módulo a tracción indirecta. Fuente: norma EN 12697-26:2012 Anexo C.	7776

Fig 4.3-3. Carga en forma de onda haversiana en ensayo de módulo a tracción indirecta. Fuente: norma EN 12697-26:2012.	<u>7877</u>
Fig 4.3-4. Montaje en laboratorio de probeta para medición de Módulo a tracción indirecta en máquina de ensayos.	<u>7978</u>
Fig 4.3-5. Imagen del software Dynapave para el ensayo de Módulo a tracción indirecta a 5°C y 0.5Hz (495ms de RISE TIME) según la norma EN 12697-26:2012.	<u>8079</u>
Fig 4.3-6. Espécimen ubicado entre placas paralelas para configuración del ensayo de deformación permanente.	<u>8281</u>
Fig 4.3-7. Esquema representativo de curva de Creep. Fuente: EN 12697-25.	<u>8382</u>
Fig 4.3-8. Curva esfuerzo-deformación en la prueba de Creep Dinámico.	<u>8483</u>
Fig 4.3-9. Imagen del software Dynapave para el Ensayo de Creep en la máquina según la norma EN 12697-25 Método A.	<u>8584</u>
Fig 4.4-1. Briqueta en ensayo de resistencia a la tracción indirecta a 25°C.	<u>8685</u>
Fig 4.4-2. Máquina universal de ensayos.	<u>8786</u>
Fig 5.1-1. Granulometrías de las mezclas con 0,25%, 0,5% y 0,75% de caucho.	<u>9291</u>
Fig 5.1-2. Granulometría de las mezclas con Calamina.	<u>9291</u>
Fig 5.1-3 Humedad óptima en ensayo de compactación modificado.	<u>9493</u>
Fig 5.1-4. A la izquierda una muestra con solo emulsión y a la derecha una briqueta con solo cemento como ligante.	<u>9594</u>
Fig 5.1-5. Briquetas con distintas dosificaciones de emulsión asfáltica.	<u>9594</u>
Fig 5.1-6. Resultados de caracterización volumétrica en la optimización del contenido de emulsión	<u>9695</u>
Fig 5.1-7. Gráfica de Módulo de Rigidez a 5°C para optimización del contenido de Emulsión	<u>9897</u>
Fig 5.1-8. Gráfica de Módulo de Rigidez a 25°C para optimización del contenido de Emulsión.	<u>9998</u>
Fig 5.1-9. Gráfica de Módulo de Rigidez a 40°C para optimización del contenido de emulsión.	<u>10099</u>
Fig 5.1-10 Curvas maestras para el módulo de rigidez de mezclas con distintas dosificaciones de emulsión.	<u>101100</u>
Fig 5.1-11. Resistencia a la tracción indirecta seca y húmeda en mezclas con distintas dosificaciones de emulsión y cemento.	<u>102101</u>
Fig 6-1 Gmm para las mezclas con caucho y calamina en función del tipo de mezcla en compactación Marshall.	<u>104103</u>
Fig 6-2. Gravedad específica Bulk para las mezclas con caucho y calamina compactación Marshall	<u>105104</u>
Fig 6-3. Densidad/Gmm [%] de las briquetas Marshall versus Compactación Giratoria con 3,2% de emulsión.	<u>106105</u>
Fig 6-4. Densidad/Gmm [%] de las briquetas Marshall versus Compactación Giratoria con 3,45% de emulsión.	<u>107106</u>
Fig 6-5. Gravedad específica Bulk para briquetas con caucho fabricadas por Compactación Marshall vs Compactación Giratoria.	<u>107106</u>
Fig 6-6. Gravedad específica Aparente para las mezclas con caucho y calamina fabricadas por compactación Marshall	<u>108107</u>

Fig 6-7 Gravedad específica aparente para briquetas con caucho fabricadas por Compactación Marshall vs Compactación Giratoria.	<u>109</u> <u>108</u>
Fig 6-8. Contenido de vacíos en briquetas fabricadas por compactación Marshall	<u>110</u> <u>109</u>
Fig 6-9. <i>Contenido de vacíos en briquetas fabricadas por compactación Marshall versus Giratoria</i>	<u>110</u> <u>109</u>
Fig 6-10. Curvas maestras con distintos porcentajes de caucho con 3,2% de emulsión, fabricados por compactación Marshall con la mezcla en caliente.	<u>116</u> <u>115</u>
Fig 6-11. Curvas maestras con distintos porcentajes de caucho con 3,45% de emulsión, fabricados por compactación Marshall.	<u>116</u> <u>115</u>
Fig 6-12. Curvas maestras con distintos porcentajes de caucho con 3,2% de emulsión, fabricados por compactación Giratoria.....	<u>118</u> <u>117</u>
Fig 6-13. Curvas maestras con distintos porcentajes de caucho con 3,45% de emulsión, fabricados por compactación Giratoria.....	<u>118</u> <u>117</u>
Fig 6-14. Curvas maestras con distintos porcentajes de calamina con 3,2% de emulsión, fabricados por compactación Marshall.	<u>120</u> <u>119</u>
Fig 6-15. Deformación permanente acumulada para las mezclas fabricadas en compactación Marshall vs Compactación Giratoria a 40°C con un esfuerzo axial de 100kPa.	<u>122</u> <u>121</u>
Fig 6-16. Resistencia a la tracción indirecta a 25°C en mezclas con caucho - Briquetas fabricadas por compactación Marshall	<u>124</u> <u>123</u>
Fig 6-17. Resistencia a la tracción indirecta en mezclas con caucho - Briquetas fabricadas por compactación Giratorio	<u>125</u> <u>124</u>
Fig 6-18. Resistencia a la tracción indirecta en mezclas con calamina - Briquetas fabricadas por compactación Marshall	<u>126</u> <u>125</u>
Fig 7-1. Esquema Unidad funcional.	<u>128</u> <u>127</u>
Fig 7-2. Indicador energía consumida por tipo de mezcla.	<u>130</u> <u>129</u>
Fig 7-3. Indicador agua consumida por tipo de mezcla.	<u>130</u> <u>129</u>
Fig 7-4. Indicador CO2 por tipo de mezcla	<u>131</u> <u>130</u>
Fig 7-5. Energía consumida por etapa de construcción inicial y mantenimiento por tipo de mezcla [MJ].	<u>131</u> <u>130</u>
Fig 7-6. Consumo de agua por etapa de construcción inicial y mantenimiento por tipo de mezcla [kg].	<u>132</u> <u>131</u>
Fig 7-7. CO2 por etapa de construcción inicial y mantenimiento por tipo de mezcla[Mg].	<u>132</u> <u>131</u>
Fig 10-1. Densidad versus número de giros para la mezcla 3,2EM_0CR	<u>149</u> <u>148</u>
Fig 10-2. Densidad versus número de giros para la mezcla 3,2EM_0,25CR	<u>149</u> <u>148</u>
Fig 10-3. Densidad versus número de giros para la mezcla 3,2EM_0,50CR	<u>150</u> <u>149</u>
Fig 10-4. Densidad versus número de giros para la mezcla 3,2EM_0,75CR	<u>150</u> <u>149</u>
Fig 10-5. Densidad versus número de giros para la mezcla 3,45EM_0CR	<u>151</u> <u>150</u>
Fig 10-6. Densidad versus número de giros para la mezcla 3,45EM_0,25CR	<u>151</u> <u>150</u>
Fig 10-7. Densidad versus número de giros para la mezcla 3,45EM_0,5CR	<u>152</u> <u>151</u>
Fig 10-8. Densidad versus número de giros para la mezcla 3,45EM_0,75CR	<u>152</u> <u>151</u>
Fig 10-9. Emulsión asfáltica utilizada en la investigación. Fuente: MPI Ltda.....	<u>153</u> <u>152</u>

Fig 10-10. Módulo de Rigidez a 5°C para distintos porcentajes de Caucho con 3,2% de emulsión fabricados por compactación Marshall.	<u>155</u> <u>154</u>
Fig 10-11. Módulo de Rigidez a 5°C para distintos porcentajes de Caucho con 3,45% de emulsión fabricados por compactación Marshall.	<u>155</u> <u>154</u>
Fig 10-12. Módulo de Rigidez a 25°C para distintos porcentajes de Caucho con 3,2% de emulsión fabricados por compactación Marshall.	<u>155</u> <u>154</u>
Fig 10-13. Módulo de Rigidez a 25°C para distintos porcentajes de Caucho con 3,45% de emulsión fabricados por compactación Marshall.	<u>155</u> <u>154</u>
Fig 10-14. Módulo de Rigidez a 40°C para distintos porcentajes de caucho con 3,2% de emulsión fabricados por compactación Marshall.	<u>156</u> <u>155</u>
Fig 10-15. Módulo de Rigidez a 40°C para distintos porcentajes de caucho con 3,45% de emulsión fabricados por compactación Marshall.	<u>156</u> <u>155</u>
Fig 10-16. Módulo de Rigidez a 5°C para distintos porcentajes de Caucho con 3,2% de emulsión fabricados por compactación Giratoria.	<u>156</u> <u>155</u>
Fig 10-17. Módulo de Rigidez a 5°C para distintos porcentajes de Caucho con 3,45% de emulsión fabricados por compactación Giratoria.	<u>156</u> <u>155</u>
Fig 10-18. Módulo de Rigidez a 25°C para distintos porcentajes de Caucho con 3,2% de emulsión fabricados por compactación Giratoria.	<u>157</u> <u>156</u>
Fig 10-19. Módulo de Rigidez a 25°C para distintos porcentajes de Caucho con 3,45% de emulsión fabricados por compactación Giratoria.	<u>157</u> <u>156</u>
Fig 10-20. Módulo de Rigidez a 40°C para distintos porcentajes de caucho con 3,2% de emulsión fabricados por compactación Giratoria.	<u>157</u> <u>156</u>
Fig 10-21. Módulo de Rigidez a 40°C para distintos porcentajes de caucho con 3,45% de emulsión fabricados por compactación Giratoria.	<u>157</u> <u>156</u>
Fig 10-22. Módulo de Rigidez a 5°C para distintos porcentajes de Calamina con 3,2% de emulsión fabricados por compactación Marshall.	<u>158</u> <u>157</u>
Fig 10-23. Módulo de Rigidez a 25°C para distintos porcentajes de Calamina con 3,2% de emulsión fabricados por compactación Marshall.	<u>158</u> <u>157</u>
Fig 10-24. Módulo de Rigidez a 40°C para distintos porcentajes de Calamina con 3,2% de emulsión fabricados por compactación Marshall.	<u>158</u> <u>157</u>
Fig 10-16. Curva de Creep para mezcla control con 3,45% de emulsión. Compactación Marshall vs Giratoria.	<u>159</u> <u>158</u>
Fig 0-1. Curva de Creep para mezcla control con 3,2% de emulsión y 0,25% de CR. Compactación Marshall vs Giratoria	<u>159</u> <u>158</u>
Fig 0-1. Curva de Creep para mezcla control con 3,2% de emulsión y 0,25% de CR. Compactación Marshall vs Giratoria.	<u>159</u> <u>158</u>
Fig 0-1. Curva de Creep para mezcla control con 3,2% de emulsión y 0,5% de CR. Compactación Marshall vs Giratoria.	<u>159</u> <u>158</u>
Fig 0-2. Curva de Creep para mezcla control con 3,45% de emulsión y 0% de CR. Compactación Marshall vs Giratoria	<u>160</u> <u>159</u>

Fig 0-3. Curva de Creep para mezcla control con 3,45% de emulsión y 0,25% de CR. Compactación Marshall vs Giratoria	<u>160</u> 159
Fig 0-4. Curva de Creep para mezcla control con 3,45% de emulsión y 0,5% de CR. Compactación Marshall vs Giratoria	<u>160</u> 159
Fig 0-5. . Curva de Creep para mezcla control con 3,45% de emulsión y 0,75% de CR. Compactación Marshall vs Giratoria	<u>160</u> 159

Listado de Tablas

Tabla 2-1. Tasas de reciclaje en países europeos. Fuente: AEPA (2013).....	23
Tabla 2.2-1. Resumen de tipos de emulsiones, descripción y principales aplicaciones. Fuente: (Mercado R. et al., 2008).....	27
Tabla 2.2-2. Tipos de emulsiones utilizadas para reciclaje. Fuente: autor.	29
Tabla 2.5-1 Distintos métodos de compactación. Fuente: Adaptado de Batista, Antunes, María, & McNally, 2012.....	33
Tabla 2.5-2 Condiciones de curado utilizadas en la literatura consultada. Adaptado de Batista, Antunes, María, & McNally, 2012.....	35
Tabla 2.6-1. Criterios mínimos aceptación MRF. Fuentes: autores.....	36
Tabla 2.6-2. Valores para Módulos de Rigidez medidos a tracción indirecta.	38
Tabla 3.1-1. Contenido de Asfalto en el RAP.....	49
Tabla 3.1-2. Gravedad específica y absorción del RAP por fracción.	50
Tabla 3.2-1. Índice de penetración del asfalto de la emulsión.....	5655
Tabla 4-1. Nomenclatura utilizada para identificación de las mezclas.....	6362
Tabla 4-2 Plan experimental.....	6463
Tabla 4-3. Lista de ensayos y normas utilizadas.	6564
Tabla 4.3-1. Parámetros prueba de Creep.	8483
Tabla 5.1-1 Proporciones de los agregados en la mezcla.	8988
Tabla 5.1-2. Granulometría ART. 461 CAPÍTULO 4 ESPECIFICACIONES GENERALES DE INVIAS vs Granulometría recomendada por el manual de reciclaje en frío Wirtgen 2012.	9089
Tabla 5.1-3 Demanda teórica de asfalto.....	9392
Tabla 5.1-4. Módulos de las mezclas con diferentes contenidos de emulsión a 3 temperaturas y 4 frecuencias en MPa.....	9796
Tabla 5.1-5. ANOVA tres factores del módulo de rigidez.	10099
Tabla 5.1-6. Requisitos de resistencia encontrados en la literatura para mezclas recicladas en frío con emulsión.....	103102
Tabla 6-1. Densidad con respecto a la gravedad específica máxima teórica del espécimen recién compactado.	106105
Tabla 6-2. Resultados del análisis de varianza ANOVA de la prueba de módulo de rigidez para muestras compactadas por compactación Marshall.....	111110
Tabla 6-3. . Resultados del análisis de varianza ANOVA de la prueba de módulo de rigidez de rigidez para muestras compactadas por compactación Giratoria	113111
Tabla 6-4. Resultados del análisis de varianza ANOVA de la prueba de módulo de rigidez de rigidez para muestras con calamina compactadas por compactación Marshall.....	114113
Tabla 6-5. Parámetros de ajuste y R2 de las curvas maestras de las mezclas con caucho vs mezcla en caliente. Compactación Marshall.	115114

Tabla 6-6. Parámetros de ajuste y R2 de las curvas maestras de las mezclas con caucho fabricadas por Compactación Giratoria.....	117 116
Tabla 6-7. Parámetros de ajuste y R2 de las curvas maestras de las mezclas con calamina. Compactación Marshall.....	119 118
Tabla 7-1. Escenarios planteados.....	129 128
Tabla 7-2. Resumen de indicadores para construcción inicial y mantenimiento.	129 128

Nomenclatura utilizada

RAP: pavimento asfáltico reciclado (en inglés, Reclaimed asphalt Pavement).

MRF: mezcla reciclada en frío.

CIR: reciclaje en frío en sitio (en inglés, cold in place recycling).

FDR: reciclado de la profundidad total de la estructura (en inglés, full depth Reclamation).

HIR: reciclado en caliente en sitio (en inglés, hot in place recycling).

C: cemento.

CR: caucho reciclado.

EA: escoria de acero, que en los datos experimentales se menciona como CA: calamina.

MC: mezcla en caliente.

A: asfalto.

M: compactación Marshall.

G: compactación giratoria.

COE: contenido óptimo de emulsión.

Resumen

La disminución de las emisiones generadas al medio ambiente, es un compromiso de la industria a nivel mundial. La industria del asfalto, específicamente, ha dedicado esfuerzos para disminuir las emisiones generadas al medio ambiente a través del incentivo del reciclaje de pavimentos. El reciclaje, permite reducir y eliminar la extracción de materiales vírgenes, reduciendo así las emisiones de CO₂ al medio ambiente y garantizando una disminución en los costos de la infraestructura vial. Por otro lado, logra disminuir el material que es depositado en las escombreras o rellenos sanitarios, lo que se traduce en la reducción del impacto ambiental de las obras. La investigación, presenta los resultados de las pruebas realizadas para evaluar las propiedades dinámicas, mecánicas y los beneficios ambientales de mezclas recicladas con emulsión asfáltica y cemento portland incluyendo dos tipos de residuos sólidos: a.) grano de caucho reciclado (CR) y b.) escoria de acero, conocida como calamina (CA). Se fabricaron muestras con dos dosificaciones distintas de CA, mediante compactación Marshall y en el caso del CR se fabricaron mezclas con tres dosificaciones y mediante dos tipos de compactación Marshall y Giratoria. Los porcentajes de calamina utilizado en la experimentación fueron 1 y 3%, por otro lado, en las mezclas con caucho se utilizaron dosificaciones de 0.25, 0.50 y 0.75%. Todas estas proporciones como reemplazo de una fracción de la masa de los agregados.

La experimentación realizada, mostró que la adición de residuos sólidos CR disminuye los módulos de rigidez en comparación con las mezclas control, la cual es una mezcla con 0% caucho o calamina. Se puede afirmar que estos resultados se deben a que los residuos interactúan con la matriz de la mezcla durante la consecución de la cohesión final, acorde a lo que plantea en su investigación con caucho de llanta en mezclas recicladas Pettinari y sus colaboradores (Pettinari et al., 2013, 2014). De los resultados de las pruebas de rigidez a tracción indirecta en las mezclas con CR, se encuentra que el módulo en estas mezclas es más susceptible a la temperatura comparada con las mezclas con CA. Esto se evidencia cuando se adiciona el contenido más alto de CR (0,75%), el módulo disminuye cerca 53% con respecto a la mezcla control mientras que las mezclas con 1% de calamina disminuye cerca del 28% con respecto a la mezcla control, estas comparaciones fueron realizadas a 25°C y 2Hz.

La deformación permanente, medida a través del Ensayo de Creep de rigidez, fue realizada sólo a las mezclas con caucho. En estas mezclas, se comparó el impacto del tipo de compactación además de las dosificaciones del caucho. En el grupo de especímenes compactados por el método estático (Marshall) para los dos contenidos de emulsión al incrementar el contenido de CR no se aprecian diferencias significativas entre las mezclas a excepción de la mezcla 3,2EM_0,5CR, es decir en este tipo de compactación el efecto del caucho es casi nulo. Por otro lado, para el método de compactación Giratoria, en el caso de 3,2% de emulsión las deformaciones permanentes de las mezclas con caucho son mayores que la mezcla control sin embargo van disminuyendo al aumentar la proporción de caucho. El método de compactación Giratoria permite una disminución de aproximadamente un 50% del valor de la deformación permanente. Esto se puede atribuir al proceso de elaboración de los especímenes, dado que genera una redistribución de las partículas debido a que presentan un porcentaje de vacíos menores que las muestras compactadas por el método Marshall.

Adicionalmente, a partir de los resultados de las pruebas de tracción indirecta se demostró que el cemento portland provee un incremento en la resistencia de la mezcla por sus propiedades aglutinantes y de densificación. El daño por humedad medido a través de la misma prueba, mostró que con la inclusión de cemento mejora la resistencia al daño por humedad reflejado en que aumenta la resistencia retenida. En el caso de las mezclas con caucho, se encontró que en la compactación giratoria les atribuye a los especímenes una resistencia a la tracción indirecta mayor en comparación con las briquetas compactadas por el método Marshall. La calamina produjo un incremento en la resistencia retenida con 3% de calamina, aumentó de 71% a 118%.

Finalmente, a partir de un análisis desde el punto de vista ambiental empleando el software PaLATE basado en la estimación de la energía consumida [MJ], agua consumida [Kg] y Co2 [Mg] o potencial de calentamiento global GWP, se encontró que las alternativas de reciclaje en frío con emulsión pueden ser consideradas como una alternativa para la construcción de infraestructura vial sostenible. Debido a que todos los parámetros de estimación del impacto ambiental analizados durante los procesos de construcción y mantenimiento por km de vía son menores que las alternativas convencionales.

Abstract

The emissions' reduction generated to the environment is a commitment of worldwide' s industry. The asphalt's industry, specifically, has dedicated efforts to reduce the emissions generated to the environment through the use of recycled asphalt pavement (RAP). The recycling allows to reduce and eliminate the extraction of virgin materials, generating the reduction of CO2's emissions to the environment and ensuring a decrease in the costs of the road infrastructure. On the other hand, it manages to reduce the material that is deposited in the dumps and / or sanitary landfills, which translates into the environmental' s reduction impact of the civil works. The present investigation exposes the results of the tests carried out to evaluate the dynamic, mechanical and environmental benefits of recycled mixtures with asphalt emulsion and Portland cement including two types of solid waste: a.) Recycled crumb rubber (CR) and b .) steel slag, known as calamine (CA). Samples were manufactured with two different dosages of CA, by Marshall Compaction and in the case of CR mixtures were made with three dosages and by two types of compaction (Marshall and Gyratory). The percentages of calamine used in the experimentation were 1 and 3%, while in the mixtures with rubber dosages of 0.25, 0.50 and 0.75% were used. All these proportions as replacement of a fraction of the mass of the aggregates.

The experimentation carried out showed that the addition of solid waste CR y CA decreases the stiffness modules compared with the control mixtures. The reduction in stiffness modulus is more likely due to pboth, to how the particles interact with the binding matrix while final cohesion is achieved (Pettinari et al., 2013, 2014). From the tests 'results of indirect tensile moduli in the mixtures with CR, it is found that the stiffness modulus in these mixtures is more susceptible to the temperature compared with the mixtures with CA. This is evidenced when the highest content of CR is added (0.75%) the module decreases[WAG1] by 53% with respect to the control mixture, while the mixtures with 1% of calamine decrease by 28% with respect to the mixture control. These comparisons are made at 25 ° C and 2Hz. These results may be because the calamine is a dense material that affects less the stress-deformation ratio than the rubber.

The permanent deformation, measured through the Dynamic Creep Test, was performed only on the rubberized mixtures. In these mixtures, the impact of the type of compaction was compared to the rubber dosages. This is attributed to the fact the method of Gyratory Compaction allows a decrease of approximately 50% of the value of the permanent deformation. That is because with this process of elaboration of the specimens generates a redistribution of the particles and produces specimens with smaller voids than Marshall Compaction.

Additionally, from the results of indirect tensile tests, it was demonstrated that Portland cement provides an increase in the strength of the mixture due to its binding and densification properties. The moisture damage measured through the same test showed that with the inclusion of cement in the mixture increases the retained strength. In the case of the mixtures with rubber, it was found that in the Gyratory Compaction attributes to the specimens a greater indirect tensile strength in comparison with the specimens compacted by the Marshall method. The calamine produced an increase in the retained resistance, from 71% in control mixtures to 118% in mixtures with 3% calamine.

Finally, from an environmental analysis using the PaLATE software based on the estimation of the consumed energy [MJ], consumed water [Kg] and CO₂ [Mg] or global warming potential GWP, it was found that the Cold Recycling alternatives with emulsion can be considered as an alternative for the construction of sustainable road infrastructure. Because all the environmental impact estimation parameters analyzed during the construction and maintenance processes are smaller than the conventional alternatives.

1. Introducción

Conservar la infraestructura vial en un nivel de servicio adecuado involucra la realización de actividades de mantenimiento y rehabilitación periódicas, estas se efectúan con el objetivo de mantener un sistema vial seguro, eficiente y sostenible (Giani *et al.*, 2015). La necesidad de utilizar alternativas de mantenimiento de la infraestructura vial que sean sostenibles ha llevado a un crecimiento significativo en el reciclaje de pavimentos y tecnologías de estabilización con asfalto (Jenkins and Collings, 2016).

Las alternativas de rehabilitación de pavimentos asfálticos utilizadas convencionalmente son las que usan asfalto en caliente, las cuales se denominan así porque calientan los agregados y especialmente el asfalto para disminuir su viscosidad y garantizar la homogenización de los componentes y el recubrimiento de los agregados. Estas prácticas generan problemas como riesgos en la salud ocupacional de los trabajadores, demoras para los usuarios y deficiencias en la capacidad de tráfico (Arimilli, Jain and Nagabhushana, 2016). Actualmente, la investigación busca desarrollar alternativas como el reciclaje en frío debido a que permiten la minimización de los impactos ambientales en los procesos de intervención del pavimento asfáltico.

El reciclaje en frío en sitio CIR (cold in place recycling) elimina la necesidad de explotación de agregados vírgenes y transporte, porque se reutiliza el pavimento asfáltico existente (Alkins, Lane and Kazmierowski, 2008; Bessa *et al.*, 2016). “La mayor parte de la carga ecológica (42 a 50%) proveniente de la rehabilitación de los pavimentos asfálticos se debe al consumo de energía, la gran ventaja de esta metodología es que se garantiza la manejabilidad del asfalto para lograr el mezclado en ausencia de energía calórica” (Bessa *et al.*, 2016). Por esta razón, el reciclaje en frío, representa el menor potencial de calentamiento global (GWP, global warming potencial), comparado con la reconstrucción y la sobrecarpeta en caliente (Thenoux, González and Dowling, 2007; Santero, Masanet and Horvath, 2011b).

Las mezclas recicladas en frío permiten la optimización de los recursos disponibles y reducir los requerimientos energéticos. Desde la perspectiva ambiental, comparado con las alternativas convencionales (sobrecarpeta en caliente y reconstrucción), se ha demostrado, que se reducen las emisiones de CO₂, metano (CH₄), óxidos nitrosos (NO_x) y gases fluorados que se emiten al medio ambiente (Bessa *et al.*, 2016). Además del reciclaje del pavimento, el uso de materiales reciclados provenientes de subproductos de la industria, permite el aprovechamiento de potenciales propiedades como el caso del caucho de llanta y de las escorias metálicas.

Las llantas constituyen un residuo de difícil disposición que se genera en gran cantidad. En el año 2010 se estimó que en la ciudad de Bogotá se produjeron cerca de 2.600.000 llantas usadas, valor que tiende a aumentar anualmente por el crecimiento del parque automotor en el Distrito Capital y en todo el país (Ministerio de Ambiente, 2010). El uso de caucho de llanta en mezclas asfálticas ha sido reportado por varios autores con resultados satisfactorios (Sacramento Country, Bollard & Brennan, 1999; Thanaya, 2003a; S. J. Lee, Akisetty and Amirkhanian, 2008; S. Lee, Akisetty and Amirkhanian, 2008; Dondi *et al.*, 2014; Pettinari *et al.*, 2014).

Por otro lado, las escorias de acero son un subproducto del proceso de producción de acero, algunas de estas producida a través de la fusión directa de varios tipos de metales. Las mezclas asfálticas que han sido fabricadas en laboratorio con escorias de acero mostraron características mecánicas similares o incluso más satisfactorias que las mezclas obtenidas utilizando agregados naturales (valores medidos de estabilidad y flujo Marshall). Desde el punto de vista ambiental, se ha demostrado que las escorias de acero pueden ser utilizada en mezclas asfálticas sin problemas de lixiviación e hidratación de los óxidos (Sorlini, Sanzeni and Rondi, 2012).

El reciclaje de materiales en mezclas asfálticas representa una alternativa prometedora para contribuir con las metas del protocolo de Kyoto, los objetivos de la Cumbre de Río 20 (Naciones Unidas, 2012) y el Acuerdo de Paris (CMNUCC, 2015) con relación a la reducción de emisiones de los gases de efecto invernadero. Incentivar el reciclaje de pavimentos y la reutilización de subproductos de la industria en mezclas asfálticas, resulta una solución viable para obras de rehabilitación de pavimentos a menor costo y ambientalmente sostenible (Maurer, Bemanian and Polish, 2007; Thenoux, González and Dowling, 2007). La presente investigación propone la caracterización dinámica, mecánica y desde el punto de vista ambiental de mezclas asfálticas recicladas en frío con emulsión asfáltica y cemento, con adición de caucho reciclado y calamina.

1.1. Antecedentes

La presente investigación ha sido realizada con financiación de la Universidad del Norte y Colciencias, en los siguientes proyectos:

- Joven Investigador Colciencias (2015). Desarrollo de materiales innovadores para una infraestructura vial sustentable.
- Agenda Interna (2015) I+D+I (Investigación-Desarrollo e Innovación). Investigación multi-escalar sobre mezclas asfálticas en frío 100% recicladas con adición de desechos sólidos.

De la misma manera se han obtenido a la fecha las siguientes publicaciones

- **Castro A**, Martínez G, Fuentes L. (2016). Efecto de la adición del polvo de llantas desechadas en mezclas asfálticas en frío con el 100% de agregados reciclados. 6th Amazon & Pacific Green Materials Congress and Sustainable Construction Materials LAT-RILEM Conference.
- G. Martínez Arguelles, L. Fuentes, A. Bonicelli, **A. Castro**, J. Santos (2017). Environmental and Mechanical benefits of Cold Recycled Bituminous Mixes with Crumb Rubber. Word Conference on pavement and asset management. Junio 12-16, Baveno, Italia.
- Artículo 1 (Diseño de mezclas recicladas en frío con emulsión asfáltica: Estado del arte)
- Artículo 2 (Laboratory investigation on Cold Recycled Mixes with Asphalt Emulsion and Crumb Rubber, en proceso de redacción)

1.2. Definición del problema y objetivos de la investigación

La construcción de pavimentos requiere una cantidad significativa de materiales y energía no renovables. Esto se refleja en el tamaño de las inversiones haciendo importante que haya una mejor comprensión de los aspectos ambientales y económicos del uso de materiales vírgenes versus materiales reciclados (Horvath, 2003). El reciclaje de pavimentos, permite lograr el ahorro de materiales, transporte, reducción de almacenamiento de materiales en botaderos y la optimización del uso de los recursos naturales (Botasso *et al.*, 2008). Es por eso, que el uso del RAP está clasificado como una tecnología amigable con el medio ambiente (Singh, Ransinchung and Kumar, 2017).

La reducción de los costos del ciclo de vida de un pavimento, es una de las ventajas importantes del reciclaje, debido a que más del 70% del costo total de la rehabilitación de un pavimento asfáltico corresponde al costo de los materiales (Lyubarskaya *et al.*, 2017). Es por esta razón que a nivel mundial el pavimento asfáltico recuperado (RAP) es uno de los materiales más reciclados en el mundo (Reyes-Ortiz *et al.*, 2012). Los primeros estudios documentados sobre el uso de RAP para la construcción de nuevas carreteras datan de 1915 (Reyes-Ortiz *et al.*, 2012). Sin embargo, solo hasta la década de 1970 con la crisis del petróleo, el reciclaje comienza a tomar importancia y con esto lograr una disminución de los costos de la fabricación de las mezclas (Karlsson and Isacson, 2006; Reyes-Ortiz *et al.*, 2012).

Muchos métodos de reciclaje han sido desarrollados, entre esos existen dos grandes grupos el reciclaje en caliente y el reciclaje en frío. El primero, requiere relativamente mucha energía eléctrica en este caso para el calentamiento, lo que conduce a una limitación de los beneficios ambientales y económicos (Karlsson and Isacson, 2006). En cambio el reciclaje en frío, evita la utilización de energía calórica para la realización de las mezclas, lo que conduce a ahorros energéticos mayores (Gao, Ni, Ph, *et al.*, 2014).

En el reciclaje en frío, aunque existen diversas metodologías que serán estudiadas en adelante, no existe una metodología de laboratorio para el diseño de mezclas en frío recicladas que incluya criterios de desempeño acordes con las exigencias actuales, que ayuden a entender el comportamiento de las mezclas, bajo condiciones de funcionamiento reales (Jenkins and Collings, 2016). Se ha demostrado que el reciclaje de pavimentos es la opción de rehabilitación más económica, pero en Colombia por la falta de información y de confiabilidad en el método hace que sea una práctica poco utilizada (Calvi, 2015; Méndez, 2015).

El reciclaje en general, permite el aprovechamiento de las propiedades de los materiales, como alternativas de prevención, mitigación y corrección ante los impactos generados por la industria, pero también representan una oportunidad de mercado con beneficios económicos (Ortiz, Anjhela; Tribilcock, 2014). Tal es el caso de las llantas en desuso o de los subproductos de la industria, que son materiales que pueden ser reutilizados en mezclas asfálticas sin riesgos de contaminación, lixiviación o problemas de calidad en las mezclas (Skaf *et al.*, 2017).

Anualmente en el país se generan en promedio 18.861 toneladas de llantas (Universidad de los Andes, 2003; ALCALDIA MAYOR DE BOGOTA D.C. and UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, 2005; Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá IDU, 2011). Las llantas en desuso, tienen un ciclo de vida que por lo

general termina en rellenos sanitarios, plantas térmicas, basureros a cielo abierto, entre otros, que generan un daño ambiental importante, debido a que son un foco de contaminación, potencial de incubación de mosquitos en épocas de lluvia y contaminación visual (Universidad de los Andes, 2003). Sin embargo, ha tenido el uso de caucho reciclado en mezclas asfálticas con excelentes resultados tanto en mezclas en caliente incorporándolo al asfalto, (Sacramento Country, Bollard & Brennan, 1999; Cao, 2007a; S. J. Lee, Akisetty and Amirkhanian, 2008; Moghadas *et al.*, 2012; Hassan *et al.*, 2014; Xiao, 2014).

Por otro lado, la calamina subproducto de la producción de acero, es un sólido fino homogéneo granular, de color gris que se genera en el proceso de trefilado, enderezado, figurado y entorchado del acero (Ferrasa, 2015). Este subproducto generado en altas cantidades es llevado directamente a los rellenos sanitarios sin la posibilidad de la reutilización. Sin embargo, se ha encontrado que pueden ser utilizada en mezclas asfálticas sin problemas de lixiviación e hidratación de los óxidos (Sorlini, Sanzeni and Rondi, 2012).

Con base en lo anterior, se plantea la siguiente pregunta: ¿es posible producir mezclas recicladas en frío con emulsión asfáltica con adición de ciertos porcentajes de caucho o calamina que cumplan los requisitos mínimos normativos?

Para dar respuesta a la pregunta problema planteado se proponen los siguientes objetivos para la investigación:

Objetivo General

Estudiar la influencia en las propiedades dinámicas y mecánicas de mezclas asfálticas en frío 100% recicladas empleando caucho reciclado de llanta y calamina.

Objetivos Específicos

- Analizar las propiedades físicas del RAP.
- Evaluar las propiedades físicas y químicas del caucho CR y calamina CA.
- Diseñar una mezcla reciclada en frío recopilando las buenas prácticas de optimización de los componentes de la mezcla.
- Analizar la influencia en las respuestas dinámicas y mecánicas de las mezclas recicladas en frío con emulsión asfáltica con adición de CR.
- Evaluar la influencia en las respuestas dinámicas y mecánicas de las mezclas recicladas en frío con emulsión asfáltica con adición de CA.
- Revisar el ciclo de vida del nuevo material: ahorro energético y de emisiones de CO₂ de la producción de mezclas recicladas en frío con caucho de llanta y calamina frente a los materiales viales convencionales.

1.3. Estructura de la Tesis

Para lograr los objetivos de la investigación se estudiaron metodologías de diseño existentes sobre mezclas asfálticas recicladas en frío con emulsión. El desarrollo de esta tesis, se enfocó en la comprensión de las propiedades de las mezclas recicladas en frío con adición de residuos sólidos, bajo distintas condiciones definidas por el objetivo de cada ensayo. El material en el que se enfocó la investigación fue el caucho molido CR, sin embargo, se evaluó la calamina como un potencial material de investigación debido a que se trata al igual que el caucho de un residuo sólido.

En la presente tesis se plantea inicialmente la revisión de la literatura, la cual incluyó metodologías de diseño de mezclas asfálticas recicladas en frío con emulsión asfáltica, dónde se identificaron las experiencias en las etapas de diseño que mayormente afectan a las propiedades mecánicas de una mezcla en frío recicladas, tales como: la caracterización del agregado reciclado, la selección del tipo de agente reciclador (emulsión asfáltica), la estimación de la demanda de agente reciclador, la adición de llenantes activos, además de la fabricación de los especímenes y la evaluación bajo criterios de desempeño.

Seguido de esto, se describe el plan experimental, en dónde se plantearon los materiales utilizados y la descripción de la fase experimental. En el siguiente capítulo se describe la metodología en laboratorio y los equipos de ensayo utilizados. Posteriormente se encuentran los resultados de las pruebas realizadas con sus respectivos análisis y comentarios. Adicionalmente, con el objetivo de destacar los beneficios ambientales de las mezclas recicladas con adición de residuos sólidos, se realiza la modelación del impacto ambiental generado por cuatro alternativas de pavimentos planteadas. Finalmente, las conclusiones de la tesis y recomendaciones para las investigaciones subsecuentes para la profundización futura en el tema.

2. Revisión de la Literatura: Estado del Arte

Las mezclas recicladas en frío con emulsión asfáltica tuvieron sus inicios con los estudios del profesor Mamlouk, quién caracterizó mezclas con emulsión utilizando el ensayo de resistencia a la tracción indirecta (Mamlouk, 1979). Estas mezclas, se caracterizan porque se mezclan y compactan sin la aplicación de calor (Gao, Ni, Ph, *et al.*, 2014) y en algunos casos no necesitan la utilización de nuevas fuentes de agregados. La característica ambiental que tiene este tipo de mezclas ha incentivado la comprensión del comportamiento de estas mezclas, para interpretar para qué usos se recomienda. La intención principal de esta revisión de literatura es compilar algunos de las más actualizadas investigaciones realizadas en MRF y sus hallazgos relacionados con el diseño de estas mezclas y las pruebas de desempeño que se realizan para su caracterización.

Del material disponible a nivel mundial, se recicla en frío los porcentajes mostrados en la Tabla 2-1 según las cifras mostradas es un porcentaje inferior comparado con la mayoría que es reciclado en caliente salvo en República Checa que la mayoría del material es reciclado en frío (CEDEX, 2015).

Tabla 2-1. Tasas de reciclaje en países europeos. Fuente: AEPA (2013)

País	(t) Material asfáltico reciclable disponible	% Material asfáltico reciclable disponible usado en				% De la producción de las nuevas mezclas en caliente y templadas que contengan material reciclado
		Reciclado en caliente y reciclado semicaliente	Reciclado templado	Reciclado en frío	Capas granulares	
Alemania	11.500.000	90			10	
Austria	750.000	95		3	2	
Bélgica	1.500.000	61				51
Dinamarca	790.000	83	0	0	17	58
Eslovaquia	26.000	90	0	5	5	
Eslovenia	26.000	26	0	20	54	5
España	205.000	85	0	7	8	1,3
Finlandia	860.000					20
Francia	6.900.000	64				>65
Grecia						0.03
Hungría	88.000	80	0	10	10	20
Islandia	15.000					3.0
Irlanda	150.000					
Italia	10.000.000	20				
Luxemburgo	300.000	90	0	10	0	50
Noruega	686.268	21	0	5	74	20
Países Bajos	4.500.000	76				70
Polonia	1.100.000	5				0,2
Reino Unido	4.000.000- 5.000.000					
República Checa	1.450.000	18	0	25	20	10
Rumania	22.000	20	20	20	30	10
Suecia	900.000	80	5	5	10	70
Suiza	1.370.000	48	17	15	8	27
Turquía	1.200.000	3		1	96	1

2.1. Caracterización del RAP

La gradación es la distribución de los tamaños de las partículas de agregados. Esta puede ser influenciada por la operación de fresado del material a tratar, las condiciones de deterioro del pavimento fresado, la profundidad de molienda, además de la velocidad y la dirección en la que se realizó la molienda del material (Wirtgen Group, 2012).

Teniendo en cuenta que los agregados son el esqueleto de la mezcla, garantizar una buena distribución granulométrica en una mezcla, permitirá un buen desempeño y la garantía de alcanzar la densidad que minimice los vacíos en el agregado mineral VMA y adicionalmente crea condiciones adecuadas para el óptimo contenido emulsión y de agua (Hui, Yao; Liang, Li; Hu and Yang, 2011; Thanaya, Negara and Suarjana, 2014; Pettinari and Simone, 2015). La gradación del material reciclado, puede mejorarse de ser necesario, con el uso de agregados vírgenes de adición, en el caso de que la granulometría encontrada requiera de ajustes (Stroup-Gardiner, 2011).

Como guía para una buena gradación, se recomienda la ecuación de Fuller Ecuación 2.1-1, para obtener una gradación idónea con un valor de n , coeficiente de gradación de 0.45 ó 0.5 (Asphalt Academy, 2009; Wirtgen Group, 2012). Se recomienda que el valor contenido de finos se encuentre entre 2% y 9% (Asphalt Academy, 2009). La utilización del contenido de finos apropiado se garantiza la resistencia y elasticidad requeridas (Hodgkinson and Visser, 2004).

Ecuación 2.1-1. Ecuación de Fuller.

$$P = \left[\frac{d}{D} \right]^n$$

Dónde:

P = porcentaje que pasa el tamaño d .

d = tamaño del agregado.

D = tamaño máximo del agregado

n = **coeficiente de gradación = 0,45 ó 0.5**

Adicionalmente los siguientes parámetros son utilizados para conocer las características relevantes del RAP:

- Extracción del asfalto del RAP y caracterizarlo en términos de su índice de penetración (Wirtgen Group, 2012).
- Límites de Atterberg, para conocer la plasticidad del material (Asphalt Academy, 2009; Wirtgen Group, 2012).

- Relación humedad-densidad (Wirtgen, 2004; Wirtgen Group, 2012; Diefenderfer, Brian K; Apeagye, 2014; Bessa *et al.*, 2016).

2.2. Selección del tipo de agente reciclador

Los ligantes utilizados para estabilización de materiales reciclados en frío usualmente han sido emulsión asfáltica y asfalto espumado. A nivel mundial, el tipo más común usado para fines de reciclaje es la emulsión asfáltica de rompimiento lento. Esta tiene la ventaja de brindar el tiempo adecuado para mezclar sin que se haya roto la misma (es decir, se hayan separado las fases: oleosa y acuosa) (AEMA, 2008).

Una emulsión asfáltica, es una dispersión pequeñas gotas de asfalto , establecidas en una fase acuosa gracias a la presencia de un agente emulsionante (Mercado, Bracho and Avendaño, 2008). Normalmente se dispersa una fase oleosa (asfalto), en una fase continua de tipo acuoso (O/W), en caso de ser una emulsión inversa, se denomina (W/O) en la cual los asfaltos se dispersan, pequeñas gotas de agua. Incluso se puede dar el caso, que dentro de una misma fase, se encuentre otra dispersa en ella, no necesariamente con la misma composición de la fase continua, ese es el caso de las emulsiones (O/W/O) (Salomon, 2006).

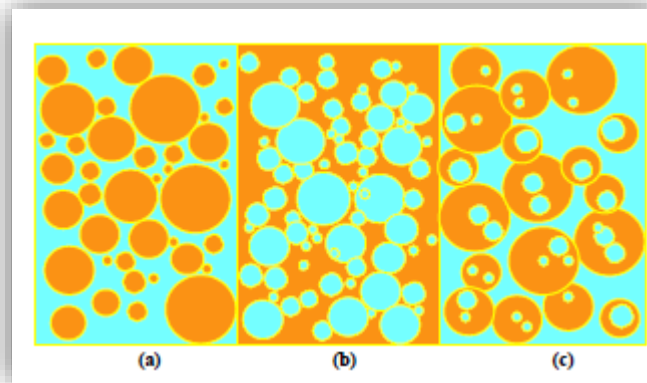


Fig 2.2-1. Tipos de emulsión. a) O/W b) W/O c) W/O/W. Fuente: (James, 2006)

Para lograr la estabilidad de una emulsión por horas, días e incluso semanas o meses, se adiciona un surfactante que rompe las tensiones interfaciales entre los componentes. Cuando se habla de emulsiones asfálticas, se refiere a dispersiones de pequeñas partículas de un cemento asfáltico en una solución de agua y un agente emulsificante de carácter catiónico, lo que determina la denominación de la emulsión. (SUMINISTRO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA ARTÍCULO 411 - 13 INVIAS, 2013).

Obteniéndose un producto relativamente fluido, cumpliéndose el objetivo principal, fluidificar el asfalto, disminuyendo su viscosidad para lograr la trabajabilidad a bajas temperaturas. Las emulsiones pueden clasificarse dependiendo de la fase en la que disuelva el surfactante, pueden ser directas o inversas. También es posible clasificarlas en función del tipo de surfactante usado, la tasa de sedimentación que da una idea de cuán rápido se rompe la emulsión: lento, medio o rápido, lo cual es afectado por la concentración de surfactante, tipo y presión atmosférica (Mercado, Bracho and Avendaño, 2008).

Según el Manual Básico de Emulsiones Asfálticas publicado por el AEMA, 2009, los usos principales de las emulsiones son:

Tratamientos superficiales

- **Scrub Seal:** es una opción para sellar grietas con asfalto modificado a presión, que se utiliza para pavimentos agrietados y envejecidos, pero con grietas no completamente activadas.
- **Chip Seal:** aplicar una lechada o micropavimento sobre una superficie tratada (con un tratamiento superficial simple o doble).
- **Fog Seal:** sello que se realiza sobre una nueva superficie de pavimento en caliente, con el fin de bloquear la salida de finos y vacíos superficiales, también es conocido como un spray de rejuvenecimiento.
- **Sand Seal:** Riego de arena, es un riego con emulsión, seguido de la aplicación de una capa de arena limpia o agregado fino, lo cual ayuda a mejorar la resistencia al deslizamiento.
- **Slurry Seal:** lechada asfáltica, mezcla de consistencia fluida, compuesta por emulsión asfáltica de rotura lenta, agregado fino bien gradado (normalmente de tamaño máximo 10 mm), llenante mineral, agua y eventualmente aditivos
- **Microsurfacing:** microaglomerado, es similar a una slurry seal, pero con las bondades del cemento asfáltico modificado con polímeros.
- **Cape Seal:** es el mismo chip seal, pero sólo con una lechada asfáltica, pues no se trabaja con emulsiones modificadas.

Tipos de reciclaje de pavimentos asfálticos

➤ Mezclas en frío in-situ:

Consiste en la realización de una mezcla agregados, con cemento asfáltico fluidizado en forma de emulsión que puede ser modificada o simplemente en estado natural. Adicionalmente, estas pueden al mismo tiempo ser mejoradas con adición de diferentes componentes.

- **Mezclas en caliente in-situ:** las más tradicionales, que consisten en la mezcla de cemento asfáltico modificado o no con agregados y si es el caso también mejoradores.

- **Mezclado en planta central:** son mezclas que se realizan en una planta de mezclado, la cual tiene unas especificaciones de proporciones diseñadas para ser creadas en cantidades industriales, con todos los procesos de control de calidad para la comercialización en masa.

Otras aplicaciones como: estabilización, reparcheo, riego de liga: el cual es usado para garantizar la adhesión entre dos capas asfálticas, paleativos de polvo, riego de imprimación y relleno de fisuras.

Clasificación de las emulsiones asfálticas

Las emulsiones asfálticas se clasifican en función la concentración de cada fase, el tipo de surfactante utilizado, el cual le confiere la carga superficial a las gotas de asfalto y de la velocidad en la que se rompen, cuando se encuentran en contacto con los agregados. En la Tabla 2.2-1 se presenta un resumen de los tipos de emulsiones y sus principales aplicaciones.

Según la concentración de cada fase se clasifican en directas; en las cuales la fase hidrocarbonada se encuentra dispersa en la fase acuosa continua; y las inversas o emulsiones de alta flotación, en la que la fase continua es el asfalto. Según la segunda clasificación mencionada, se dividen en catiónicas (carga positiva), aniónicas (carga negativa) y anfóteros (que poseen ambas cargas ya que el surfactante tiene dos cabezas una positiva y la otra negativa). Y finalmente, según la rapidez con la que coalescen sobre las partículas de asfalto, lo cual depende de la concentración de surfactante y condiciones ambientales. Para entender la nomenclatura usada para identificarlas, se usa el prefijo C para emulsiones catiónicas, sino lo tiene se asume que es una emulsión aniónica o no-iónica. Adicionalmente, también se usan sufijos para definir el grado de viscosidad, por ejemplo 1 y 2, para viscosidades Saybolt Furol a 122°F, entre 200-100s y 100-400s, respectivamente. Así mismo para la penetración el sufijo h se utiliza para alta penetración. Por ejemplo una emulsión CSS-1h, es una emulsión catiónica, de rompimiento lento, de baja viscosidad (20-100s) y de baja penetración (40-90) dmm. (Mercado R. et al., 2008).

Tabla 2.2-1. Resumen de tipos de emulsiones, descripción y principales aplicaciones. Fuente: (Mercado R. et al., 2008)

<i>Tipo de Emulsión</i>	<i>Descripción</i>	<i>Principales Aplicaciones</i>
RS (Rapid Setting = rotura rápida)	Interactúan rápidamente con el agregado.	Tratamientos superficiales.
	Producen películas resistentes y algunos grados tienen altas viscosidades (RC-2 CRS-2), esto con la finalidad de prevenir el escurrimiento luego de aplicada la capa.	Aplicaciones de rociado.
		Bacheos.
		Sellos arenosos

MS (Medium Setting = rotura media)	No se rompen al contacto con el agregado, por eso, son elaboradas en planta y transportadas hasta el sitio de aplicación.	Tratamientos superficiales, para mezclas en frío o caliente, con granulometrías abiertas.
HF (Hight float = alta flotación)	Son diseñadas para que se cree una densa película asfáltica sobre el agregado, sin riesgo de escurrimiento. Adicionalmente, son resistentes a los cambios de temperatura, debido a que crean una estructura de gel en el asfalto residual. Proveen mezclas, con alta fuerza adherente y alta resistencia por la alta flexibilidad.	Sellos baratos (bacheos), dónde el cubrimiento del agregado es completo. Para climas fríos provee mezclas menos rígidas (más elásticas) y para climas cálidos de alta rigidez.
SS (Slow Setting= rotura lenta)	Son diseñadas para un tiempo máximo tiempo de mezcla con los agregados, especiales para usar con granulometrías densas, con alto contenido de finos. Tienden a ser de viscosidad baja, la cual puede disminuirse con la adición de agua.	Pavimentación. Bases de granulometría densa. Bases para estabilización.
Polymer Modified Grades (Modificadas con polímeros)	Son superiores en grado, que las emulsiones convencionales, debido a que tienen adición de polímero. A su vez, esta condición produce que el asfalto en esta emulsión sea más adhesiva y elástica, mejorando la resistencia al deslizamiento y el agrietamiento a altas temperaturas.	Tratamientos superficiales, garantizando disminución en la pérdida de agregados.

En Colombia, es comúnmente utilizada la emulsión catiónica de rompimiento lento, algunas recomendaciones para tipos de emulsiones recomendadas para el reciclaje se encuentran en la Tabla 2.2-2.

Tabla 2.2-2. Tipos de emulsiones utilizadas para reciclaje. Fuente: autor.

Característica	Fuente
Emulsión asfáltica: De rompimiento lento. Penetración: 100-250 dmm. Compatible con los agregados comprobado con ensayo INV-69-13	Artículo 461-13 (INVIAS, 2013b)
Emulsión asfáltica: Catiónica De rompimiento lento. Tipo: CRL-1 ó CRL-1h*	Artículo 340-13. (INVIAS, 2013b)
Emulsión asfáltica: Catiónica De rompimiento lento.	(Wirtgen Group, 2012)
Emulsión asfáltica: Aniónica De rompimiento lento.	(Asphalt Academy, 2009)
Emulsiones asfálticas especiales para reciclaje:	(Stroup-Gardiner, 2011)
<ul style="list-style-type: none"> • CSS-1* • CSS-1h* • CSS-1hP* • CMS-2S* • HFMS-2, HFMS-2S* • HF-150, HF-300P* 	

* CRL-1=CSS1: emulsión catiónica de rompimiento lento, 1 (baja viscosidad).

CRL-1h=CSS-1h: emulsión catiónica de rompimiento lento, 1 (baja viscosidad),

h (hard penetration). CSS-1hP: P (modificada con polímeros).

HFMS-2: HF (alta flotabilidad), MS (rompimiento medio), 2 (alta viscosidad).

HF-150, HF-300P: HF (alta flotabilidad), 150 y 300 son rango de penetración.

2.3. Estimación de la demanda de agente reciclador: contenido óptimo de fluidos

Las mezclas en frío que se fabrican con emulsión asfáltica son conocidas, por sus siglas en inglés, como BESM (Bitumen Emulsion Stabilised Mixtures) (Tebaldi *et al.*, 2014a). Los fluidos en este tipo de mezcla, están constituidos por el agua de la emulsión, el asfalto residual de la emulsión, la humedad natural de los agregados al ser mezclados y el agua de pre-envuelta. Esta es requerida para humedecer los agregados previamente a la aplicación de la emulsión evitando su rompimiento acelerado y conseguir una mejor manejabilidad.

El contenido de fluidos afecta la organización de las partículas en la mezcla y tiene dos funciones principales: unión y densificación de la mezcla. El contenido de fluidos óptimo (CFO) se define como el que permite obtener la densidad seca máxima, debido al hecho que con este se configura un embalaje más denso de las partículas de agregado, en comparación con únicamente agua. Los fluidos, además, son los encargados de lubricar las partículas y dispersar la emulsión o el asfalto espumado durante el mezclado (Asphalt Academy, 2009; Jiang *et al.*, 2011; Wirtgen Group, 2012; Tebaldi *et al.*, 2014a).

Algunas metodologías se enfocan en la determinación del contenido óptimo de asfalto residual para el adecuado cubrimiento de los agregados. Este es el caso de la metodología de Oregon, estima la demanda de asfalto residual, con base en la superficie específica del agregado reciclado, y con ésta se realizan los especímenes. En el caso de mezclas recicladas, a medida que se incrementa el porcentaje de RAP, el porcentaje óptimo de emulsión disminuye. Esto se atribuye a que el asfalto envejecido residual posiblemente está siendo rejuvenecido o suavizado por la adición de un nuevo ligante. Lo que conduce a un incremento en el ITS y el Módulo de Rigidez, en comparación con las mezclas de agregado vírgen (Lee *et al.*, 2016).

La Ecuación 2.3-1 es utilizada para calcular el asfalto residual requerido en función del área superficial (Thanaya, Negara and Suarjana, 2014). Sin embargo, en la mayoría de los casos los agregados reciclados se encuentran cubiertos por una película de *mastic* (asfalto y finos) que disminuye su capacidad de absorber asfalto y humedad. Calcular la demanda a través de solo el área superficial sería ignorar el efecto del asfalto que cubre el RAP (Xiao and Yu, 2011).

En este orden de ideas, se puede afirmar que el RAP si se mezcla apropiadamente con un asfalto virgen relativamente blando, puede aportar valiosas propiedades viscoelásticas a la mezcla asfáltica (McDaniel, Rebecca S. Soleymani *et al.*, 2000). De hecho, se ha comprobado a través de ensayos de resistencia a la tracción indirecta, módulo de rigidez y fatiga, los cuales son ensayos que miden propiedades asociadas al envejecimiento del asfalto en la mezcla, que la presencia del asfalto envejecido en las mezclas recicladas, mejora su desempeño (Jinhai Yan *et al.*, 2014). Para calcular el asfalto que requiere la mezcla, teniendo en cuenta el asfalto que contiene el RAP, se puede utilizar la Ecuación 2.3-2, de origen empírico, propuesta por Asphalt Institute en 2007 (Arimilli, Jain and Nagabhushana, 2016).

Ecuación 2.3-1. Demanda de asfalto por superficie específica.

$$Pb = (0,05A + 0,1B + 0,5C) * (0,7)$$

Asphalt Institute, 1989.

$$P = \% \text{ contenido inicial de asfalto residual}$$

A = % Agregado grueso retenido en 2,36 mm

B = % Agregado fino que pasa 2,36 mm y se retiene en 0,075

C = % de agregado que pasa el tamiz de 0,075 mm

Ecuación 2.3-2. Demanda de asfalto residual

$$Pnb = Pb - \frac{(100 - r) * Psb}{100}$$

Dónde:

Pnb = es el asfalto residual nuevo a añadir.

r = es el porcentaje de agregado virgen a ser añadido a la mezcla.

Psb = es el porcentaje de asfalto residual en el agregado reciclado.

2.3.1. Método Marshall Modificado

El método marshall Modificado, consiste en: primero, la determinación del contenido óptimo de emulsión (COE) y segundo, la determinación del contenido de agua óptimo (OMC), buscando máxima estabilidad y el contenido óptimo de vacíos, entre 9 y 14%. Pero entre las desventajas de este método, se encuentra que: no especifica un procedimiento para determinar los contenidos óptimos de emulsión y agua. Además, no menciona las condiciones de curado a las que deben someterse los especímenes (tiempos y temperaturas) (Lee, Brayton and Harrington, 2002).

2.4. Adición de llenantes activos a la mezcla

El cemento Portland es un filler ampliamente utilizado como llenante mineral y aglomerante secundario en mezclas en frío (Giuliani and Rastelli, 2004). En las mezclas en frío con emulsión, se han utilizado en la literatura reciente, con contenidos que van desde 1% hasta el 3%. Los resultados en

ensayos de estabilidad $>10\text{kN}$ y flujo $<4.185\text{m}$ en el ensayo Marshall, han permitido que se recomienden para ser utilizadas en bases y vías de bajo tránsito (Hui, Yao; Liang, Li; Hu and Yang, 2011).

El aumento de la resistencia es directamente proporcional al incremento del contenido de cemento, sin embargo por razones económicas se recomienda un valor cercano al 1% (Asphalt Academy, 2009). Este pequeño porcentaje, permite lograr un aumento de la cohesión de la matriz e incrementar la resistencia a temprana edad sin exceder los costos. La ventaja de la adición de bajas dosis de cemento es que los productos de hidratación se dispersan dentro de las películas de ligante aumentando la viscosidad de la mezcla y mejorando la resistencia a las deformaciones permanentes (Niazi and Jalili, 2009; Tebaldi *et al.*, 2014a). Además, en recientes comparaciones con la cal hidratada, se determinó que el cemento puede aumentar la estabilidad Marshall, la gravedad específica, el módulo resiliente y la resistencia a la tracción y reduce los vacíos y el flujo de las mezclas recicladas (Niazi and Jalili, 2009; Arimilli, Jain and Nagabhushana, 2016).

Por otro lado, se encuentra que la adición de cemento Portland ordinario a las mezclas en frío, ayuda a la evaporación de la humedad y con esto permite la consecución más rápida de la cohesión y la resistencia. Esta ganancia de resistencia ofrece la ventaja de la apertura parcial de la vía, durante las primeras horas de aplicado el tratamiento y del aumento de la adhesión (Asphalt Academy, 2009; Wirtgen Group, 2012; Du, 2014; Graziani *et al.*, 2016). Otro efecto positivo que tiene el cemento en las mezclas recicladas en frío es aumentar la resistencia al daño por humedad, mejorar la adhesión de la mezcla y disminuir la susceptibilidad del módulo de rigidez a cambios de temperatura (Oruc, Celik and Akpinar, 2007; Brovelli and Crispino, 2012).

2.5. Fabricación de las mezclas

La preparación de las mezclas de laboratorio involucra los protocolos de mezclado, compactación y curado de los especímenes, con el fin de simular las condiciones reales de producción y puesta en servicio. Para la creación de una mezcla los aspectos que afectan mayormente son: el método de compactación y las condiciones de curado de los especímenes (el tiempo y temperatura). Los tópicos importantes hallados en la literatura son: la temperatura de mezclado, el orden en el que se añaden los componentes de la mezcla y el tipo de mezcla utilizado, sea manual, mecánico o por amasado, en el caso del Método Hveem (Batista *et al.*, 2012).

Para la fabricación de las mezclas, primero se debe verificar la granulometría del agregado, retirar el material que sea superior al tamaño máximo escogido, que por lo general es de 1" a $\frac{3}{4}$ " (INVIAS, 2013a). La granulometría que propone Asphalt Academy en 2009 es muy utilizada para mezclas recicladas con emulsión (Bessa *et al.*, 2016). De acuerdo con el Método California, para empezar el proceso de mezcla de los materiales, se recomienda secar los agregados en horno de circulación forzada, a una temperatura no superior a 60°C , para obtener un constante contenido de humedad (Salomon and Newcornb, 2000). La temperatura de mezclado y fabricación debe ser la temperatura ambiente no menor a 10°C y en los casos que se desee calentar la mezcla no debe ser a una temperatura superior a 60°C para evitar la

evaporación del agua de la emulsión (Salomon and Newcornb, 2000; Asphalt Academy, 2009; Muench, Anderson and Bevan, 2010; Bocci *et al.*, 2011; Wirtgen Group, 2012). En la siguiente sección se describen los dos procesos importantes de la fabricación posteriores al mezclado, que son la compactación y el curado de las muestras.

2.5.1. Compactación

La compactación se puede realizar por método estático, como lo es el método Marshall, por compactación por amasado Hveem o con compactador giratorio (Martínez and Miró, 2007). Este último es un método que refleja más la compactación de las mezclas reales porque involucra presión por amasado, con una presión y ángulo establecidos, usualmente 600KPa y 1.25°, respectivamente. Resultados han demostrado que este método ayuda a obtener especímenes con densidades similares a las de las obtenidas en campo (Kim *et al.*, 2011; Gao, Ni, Ph, *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2016). En la [Tabla 2.5-1](#) se presentan los distintos métodos de compactación, definiendo el diámetro de los especímenes y el método de compactación utilizado, recopilados de la literatura reciente.

El método de compactación giratoria, consiste en la aplicación de presión axial mientras, se aplica rotación de la masa con un cierto ángulo respecto al eje vertical del pistón de compactación, durante todo el proceso de compactación la carga vertical la rotación de mantienen. El objetivo de la rotación con presión controlada y el ángulo de inclinación, es generar un esfuerzo cortante sobre la muestra durante la compactación, que simula amasado y por lo tanto la reorganización de los agregados dentro del espécimen compactado. Permitiendo la obtención de la densidad deseada, altura deseada e incluso el contenido de vacíos deseado. El proceso de compactación giratoria garantiza homogeneidad en los vacíos del centro y bordes de la muestra compactada (Burbano Carvajal and Zuluaga Astudillo, 2011).

Tabla 2.5-1 Distintos métodos de compactación. Fuente: Adaptado de Batista, Antunes, María, & McNally, 2012.

Fuente	(Wirtgen GmbH, 2012)	(Salomon and Newcornb, 2000)	(Thanaya, Zoorob and Forth, 2009)	(Cross <i>et al.</i> , 2010)	(Asphalt Academy, 2009)
Geometría de los especímenes y Método de Compactación	100mm diámetro Marshall modificado / 75 golpes por cara 150mm diámetro AASHTO Modificado	100 mm diámetro Giratoria 600KPa, 1,25°	100 mm diámetro y Compactación en dos niveles. NM*: giratoria 600kPa= 50 golpes/cara. *NP: giratoria 600KPa=120	4" diámetro y 2,5" altura Marshall 75 x 2 golpes o 30 giros a 25°C	100 mm diámetro nivel 1 Marshall o martillo vibratorio 150mm diámetro nivel 2 Martillo vibratorio

/ 75 golpes
por cara

giros =75
golpes/cara.

*NM: nivel medio. *NP: nivel pesado.

2.5.2. Curado

Definido como el proceso en el que se evapora el agua contenida en la mezcla y se consiguen las propiedades finales de la misma (Kim *et al.*, 2011; Cardone *et al.*, 2015; Graziani *et al.*, 2016). El objeto de estudiar el curado, es predecir para las condiciones particulares del proyecto, el tiempo en que la vía puede ser abierta al tráfico poco después de la construcción, sin que se presenten daños como el ahuellamiento o deformación permanente (Sebaaly *et al.*, 2004; Graziani *et al.*, 2016).

La temperatura afecta directamente la tasa de evaporación del agua y la dosificación del cemento tiene un impacto importante en los valores a largo plazo de las propiedades del material, debido a que durante el curado se desarrollan reacciones químicas que conducen a la hidratación del cemento (Graziani *et al.*, 2016). El tiempo de curado, se encuentra relacionado con la resistencia, entre mayor es el período de curado, mayor es la resistencia a la tracción indirecta (Kim *et al.*, 2011). Los factores que hacen que las propiedades de las mezclas se aceleren a través del curado son: temperatura, humedad relativa y presión. Entre más alta la temperatura, más rápido se llega al equilibrio, un clima seco es más favorable para la evaporación y presión. Además la aplicación de vacío, disminuye la presión de vapor resultando en una mayor velocidad de evaporación.

Se ha comprobado que hay variedad en las condiciones de curado utilizadas experimentalmente. Muchas investigaciones emplean procedimientos diferentes y obtienen, por ende, resultados distintos. En este sentido, se presenta un resumen de las distintas condiciones utilizadas, actualmente, para el curado de los especímenes en laboratorio (Tabla 2.5-2). Al observar los datos encontrados a esto, se puede afirmar que (...) “no es apropiado especificar un procedimiento de curado general para todos los tipos de asfalto de mezcla en frío y las condiciones climáticas para simular el proceso real en el campo” (Tebaldi *et al.*, 2014a, 2014b). Adicionalmente, el curado debe ser tal, que genere la prevención del deterioro de los especímenes, para las condiciones específicas del tipo de mezcla en frío a tratar (Bessa *et al.*, 2016).

Tabla 2.5-2 Condiciones de curado utilizadas en la literatura consultada. Adaptado de Batista, Antunes, María, & McNally, 2012

Parámetro / Fuente	Wirtgen GmbH, 2012.	(Sebaaly, Bazi, Hitti, Weitzel, & Bemanian, 2004)	(Lee K. W., Brayton, Mueller, & Singh, 2016)	Austroads Project	(Thanaya, Zoorob, & Forth, 2009)	Asphalt Academy (2002)	Martínez et al. (2007)
Curado	Especímenes de 100mm o 150mm Curado hasta masa constante= 72h 40°C. Después del curado dejar a temperatura ambiente 25°C ± 2°C. Sólo los de 150mm Curado hasta masa constante y curada hasta humedad de equilibrio. La humedad de equilibrio es: aprox. 20h 30°C o cuando la humedad se encuentre en el 50% del Óptimo.	1 día a temperatura ambiente + 3 días a 50°C.	25 ° C durante 24 horas + curado a 60 ° C durante 6 horas	3 días a 60°C	Curado a 40 ° C durante 18 a 21 días o curado a 25 ° C durante 24 horas + curado a temperatura ambiente durante 1 a 24 semanas	25 ° C durante 24 horas (especimen no cubierto) + 40 ° C durante 48 Horas (especimen recubierto de plástico)	3 días a 60°C

Según Wirtgen 2012, sólo los especímenes de 150mm de diámetro se les hace curado hasta masa constante y curado hasta humedad de equilibrio. La humedad de equilibrio es: aprox. 20h 30°C o cuando la humedad se encuentre en el 50% del Óptimo.

2.6. Criterios de desempeño de las mezclas recicladas en frío

Algunos países como Colombia han utilizado el método de inmersión-compresión para el diseño de mezclas en frío con emulsión [D1075-96 ASTM (ASTM 2005), INV E -738 (2013)](INVIAS, 2013b), el cual se encuentra normalizado en la especificación Art. 461 RECICLADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO EN EL LUGAR EMPLEANDO LIGANTES BITUMINOSOS. Este método recomienda una demanda de asfalto residual en función de la superficie específica del agregado reciclado. Sin embargo se ha encontrado que los resultados de estos ensayos de compresión no se correlacionan con las condiciones de campo (Martínez and Miró, 2007). Se ha utilizado el método inmersión-compresión y el método de tracción indirecta, en ambos casos evaluando el efecto del agua, es decir, comparando los ensayos de

resistencia, en estado seco y luego de ser acondicionadas bajo inmersión en agua, esto con el objeto se analizar la susceptibilidad al agua. Adicionalmente, se han realizado ensayos de naturaleza dinámica, como Módulos de Rigidez, Resistencia a la deformación permanente y Resistencia a la carga repetida o Fatiga.

Los ensayos a tracción indirecta, tienen importancia teniendo en cuenta que cuando el pavimento se encuentra en servicio, bajo las cargas del tráfico y condiciones reales ambientales, no sólo se aplican cargas a compresión, sino que se desarrolla una fuerza de tensión en la parte inferior de la carpeta asfáltica (Mamlouk and Zaniewski, 2009). Por esta razón, ha sido utilizado como criterio de diseño (Asphalt Academy, 2009; Wirtgen Group, 2012; Diefenderfer, Brian K; Apeagye, 2014; Bessa *et al.*, 2016). Los valores que usualmente se utilizan como rangos mínimos de aceptación, se resumen en la Tabla 2.6-1. Seguidamente se presentan los ensayos que se han utilizado para caracterización de MRF con emulsión.

Parámetro	Ensayo	Fuente	Material	Criterios mínimos de resistencia para OEC	Valor
Resistencia	Inmersión-Compresión	ART. 461 RECICLADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO EN EL LUGAR EMPLEANDO LIGANTES BITUMINOSOS	Reciclaje en frío con emulsión asfáltica o asfalto espumado	Resistencia mínima de probetas curadas en seco R_s (MPa)	2
				Resistencia conservada [%](resistencia húmeda/resistencia seca) = R_h / R_s	75
	ITS	Wirtgen Gmb, 2012	Reciclaje en frío con emulsión asfáltica	ITS_dry (KPa)	225
				ITS_wet (KPa)	100
	ITS	Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials, 2009.	Materiales estabilizados con productos bituminosos	ITS_dry (KPa)	225
				ITS_wet (KPa)	100
Características volumétricas	Gmm, Gmb	Wirtgen Gmb, 2012	Materiales estabilizados con productos bituminosos	Vacíos llenos de aire (%)	10% - 15%

Tabla 2.6-1. Criterios mínimos aceptación MRF. Fuentes: autores.

2.6.1. Gravedad específica aparente y Gravedad específica Bulk

Estas dos propiedades volumétricas, requieren de la medición de la masa y del volumen de los especímenes compactados relativas a la densidad del agua. La masa, se determina a través de medición directa con una balanza. En el caso del volumen, se puede hallar de dos maneras: directamente utilizando el desplazamiento del agua o indirectamente midiendo físicamente sus dimensiones cilíndricas., esta última sería para el cálculo de la gravedad específica aparente. En las muestras cuyo contenido de vacíos es alto, se recomienda utilizar películas auto-adheribles para evitar la entrada o absorción de agua en los vacíos. Sin embargo, se debe tener cuidado de no dejar burbujas de aire entre la superficie y la película que dentro de los cálculos serán vacíos en la mezcla. Por tal motivo se recomienda utilizar para especímenes cuya resistencia ha alcanzado un nivel estable y suficiente para que la manipulación no las deteriore (Thanaya, 2003a)

Es común el uso de la metodología de la medición de indirecta y denominarlas Gravedad específica aparente, para estimar la densidad relativa al agua en especímenes de corta edad. Debido a que conocer la resistencia y características a temprana edad es de utilidad para tomar decisiones sobre la apertura del tráfico vehicular luego de la intervención.

2.6.2. Contenido de Vacíos

Los vacíos en la mezcla, son conocidos como el componente no estructural de la mezcla reciclada (agua y aire) (Graziani *et al.*, 2016). En general, las mezclas en frío recicladas con emulsión asfáltica, tienen un contenido de vacíos alto en comparación con las mezclas en caliente que tienen contenidos entre 5 y 6%. Mezclas de 100% RAP, pueden tener contenidos de vacíos de entre 9% y 14% (Wirtgen Group, 2012; Pérez, Medina and del Val, 2013; Jinhai Yan *et al.*, 2014). El contenido de vacíos totales en la mezcla, así como la altura de las especímenes está afectado directamente con el método de compactación utilizado, en caso de ser giratorio, los vacíos disminuyen con el incremento del número de giros (Graziani *et al.*, 2016).

2.6.3. Módulos de Rigidez

El módulo de rigidez define las características visco-elásticas de un material. Para expresar este comportamiento se expresa la relación de esfuerzo y deformación a una cierta temperatura y frecuencia de carga simulando las condiciones del pavimento en servicio: ambientales y velocidad del tráfico de los vehículos. Hay distintos ensayos que nos ayudan a medirlo. Existe una muy utilizada que es a través de la compresión diametral y medición de los desplazamientos producidos por la aplicación de la carga. Se puede medir a través del ensayo es el ITSM (Indirect tensile strength modulus). Normalizado en la ASTM D7369-11 y la EN 12697-26:2012. Un valor mínimo de módulo utilizado ha sido el de 2000MPa (Thanaya, Zoorob and Forth, 2009). El módulo de rigidez, depende de la temperatura y frecuencia de carga, tal como se observa en la [Tabla 2.6-2](#).

Tabla 2.6-2. Valores para Módulos de Rigidez medidos a tracción indirecta.

ITSM [MPa]	Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Emulsión [%]	Cemento [%]	Fuente
3000	25	2	4,84	1	(Graziani, Godenzoni, Cardone, & Bocci, 2016)
4000	40	2	4,84	1	
3378	25	2	3	2	(Thanaya, Zoorob, & Forth, 2009)
2000	20	2	3,5	1	(Martínez-Echevarría, Miró Recasens, Rubio Cámez, & Menéndez Ondina, 2012)
4000	20	2	3	1	(Cardone, Grilli, Bocci, & Graziani, 2015)

2.6.4. Resistencia a la deformación Permanente: Creep

La resistencia a la deformación permanente ha sido evaluada en mezclas asfálticas por carga repetida. Normalizado en la EN 12697-25, la cual establece que el espécimen de prueba cilíndrico, se acondiciona a la temperatura de ensayo la cual debe ser elevada y es colocado entre dos placas paralelas de carga. El espécimen se somete a una presión de impulso axial cíclica, cuando se trata de ensayos uniaxiales, es decir no se aplica presión adicional de confinamiento lateral y en el caso de triaxiales cíclicos, se controla la presión de confinamiento.

En las MRF con emulsión, se ha evaluado la influencia del cemento a través de ensayos de Creep. En muestras ensayadas luego de 28 días de curado, se evidencia un incremento de las repeticiones de carga para alcanzar la falla en el ensayo de Creep, cuando es adicionado cemento a la mezcla, incluso en comparación con mezclas en cliente (Lee, Brayton and Huston, 2002; Babagoli, Ameli and Shahriari, 2016; Modarres and Ayar, 2016). De hecho las MRF sin cemento muestran una deformación acumulada alta, de aproximadamente $3700 \cdot 10^{-6}$ mm/mm esto indica que la mezcla con emulsión sin cemento tienen una resistencia bastante pobre a la deformación permanente, en comparación con mezclas con contenidos que varían entre 1% y 5% de cemento que tienen una deformación acumulada entre $2500 \cdot 10^{-6}$ y $800 \cdot 10^{-6}$ mm/mm (Oruc, Celik and Akpınar, 2007). Este resultado suele atribuirse a que se tiene un ligante más rígido y a que el cemento actúa como aglutinante secundario en estas mezcla (Babagoli, Ameli and Shahriari, 2016).

2.6.5. Resistencia a la Fatiga o Carga repetida

La vida útil en el ensayo de Fatiga es el criterio básico que caracteriza los materiales capas estructurales de pavimentos de carreteras. Se ha demostrado que la resistencia a la carga repetida es un factor significativo para la caracterización mecánica de las MRF. Conocer este parámetro, permite la predicción de la durabilidad de todo el sistema estructural (Buczyński and Iwański, 2017). Los ensayos de fatiga, pueden realizarse controlando el esfuerzo aplicado o controlando la deformación. La resistencia a la Fatiga, puede ser medida a través del ensayo de fatiga en tracción indirecta, normalizado a través de la EN-12697-24.

Este parámetro ha sido evaluado en mezclas con emulsión, encontrando que el contenido de emulsión es una de las variables que afecta significativamente el comportamiento de las mezclas, en términos del número de repeticiones a la falla, la deformación inicial y deformación total. Se encuentra que al incrementar el contenido de emulsión, se disminuye el número de ciclos a la falla (Buczyński & Iwański, 2017). Además mezclas de emulsión mostraron una mayor vida de fatiga a niveles de esfuerzo más alto cuando fueron comparados con mezclas con asfalto espumado (Yan, Ni, Yang, & Li, 2010).

Las mezclas en frío, ha sido además, modificadas con adición de materiales de desecho. Con base en los resultados se concluye que el efecto en las propiedades mecánicas que generan residuos de carbón y ceniza de residuos de carbón, es comparativo con el efecto que genera en las mezclas en frío el cemento portland ordinario en dosificaciones de 1% y 2%. Porque incrementó la estabilidad Marshall, ITS y el módulo resiliente y en especial la resistencia a la fatiga. (Modarres and Ayar, 2016).

2.7. Normativa Colombiana

El reciclaje de pavimentos asfálticos, es una tecnología desarrollada para rehabilitación de pavimentos (Lin *et al.*, 2015). Se pueden intervenir desde daños superficiales hasta daños estructurales. El tipo de rehabilitación a utilizar se escoge en función del tipo, niveles y severidad de los daños presentados y del período de intervención considerando la vida útil del pavimento (Wirtgen Group, 2012).

El reciclaje en sitio en caliente, HIR (hot in place recycling) se utiliza cuando los daños son superficiales y se intervienen pocos centímetros. El reciclaje en frío en sitio, CIR (cold in place recycling), se usa cuando existe un número, tipología y severidad mayor, pero no con daños relacionados con cargas que no se puedan extender más abajo de la superficie y el reciclaje total de la carpeta asfáltica, FDR (full Depth Reclamation) es un proceso de rehabilitación in situ que aborda toda la gama de daños en el pavimento, debido a que actúa con una profundidad superior del CIR, la carpeta asfáltica y parte de la base (Stroup-Gardiner, 2011). “Se aplica para la reconstrucción, ampliación de carriles, mejoras menores en el perfil y aumento de la capacidad estructural” (Stroup-Gardiner, 2011; Valdés *et al.*, 2011; Reyes-Ortiz *et al.*, 2012).

En Colombia, es factible desde el punto de vista económico y técnico utilizar el reciclaje en frío. El reciclaje en frío puede realizarse con emulsión asfáltica, asfalto espumado, con una proporción de uno de los anteriores y cemento\Cal o únicamente con cemento. Las razones principales son que con una inversión menor al de la reconstrucción, se permite mantener la serviciabilidad de las vías en el tiempo y adicionalmente es una tecnología que permite el aprovechamiento de las propiedades del material existente (Maurer, Bemanian and Polish, 2007).

Un ejemplo de aplicación de reciclaje en frío en sitio en Colombia, fue realizada en febrero de 2016 por el consorcio CONSOL. Sin embargo, cabe anotar que este ejemplo únicamente empleó cemento (4,5%) sin la adición de ningún residuo. (Consol, 2016). En esta experiencia se obtuvo una resistencia a la compresión de núcleos extraídos a los 7 días de haberse realizado el reciclaje entre 101% y 209% de la resistencia de diseño esperada (2,5MPa). De los antecedentes de tipo normativo, se tiene como referencia para el reciclaje en frío, las normas INVIAS y la especificación técnica del IDU 450-11, a continuación, se presenta un resumen de cada una de ellas.

2.7.1. RECICLADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO EN LUGAR EMPLEANDO LIGANTES BITUMINOSOS Art. 461 - 13

En Colombia, el reciclaje en frío con emulsión asfáltica o asfalto espumado ha sido normalizado a través del método Inmersión-compresión (norma INV E -738 2013). Con esta prueba mide la pérdida de resistencia a la compresión que se pierde por la acción del agua sobre mezclas compactadas. Se fabrican 6 muestras de dimensiones 101,6mm de diámetro y $101,6 \pm 2,5$ mm de altura. El contenido de fluidos a utilizar es igual al contenido de humedad óptimo, teniendo en cuenta que el agua que se añade a la mezcla proviene, del agua de la emulsión, el agua adicional o agua de pre-envuelta y la humedad que pueda tener el material.

Se dividen en dos grupos: tres probetas se curan durante 14 días en el baño de aire a 25°C más o menos 1°C y con una humedad relativa de 50% y el segundo grupo se cura durante 7 días en el baño de aire y luego 7 días en el baño de agua a 25°C más o menos 1°C. Estas son ensayadas aplicando compresión confinada a una velocidad de deformación de 5.08mm/min.

Finalmente, se calcula la resistencia conservada, dividiendo la resistencia promedio de las muestras ensayadas luego del acondicionamiento en el baño de agua entre la sin acondicionar. Haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$Resistencia\ conservada = \frac{R_{húmeda}}{R_{seca}}$$

2.7.2. Reciclaje de pavimento asfáltico en el sitio con emulsión asfáltica -IDU

El método propuesto por el IDU (Instituto de desarrollo Urbano) en la sección 450-11 (Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá IDU, 2011). Describe que el proceso de reciclaje en sitio con emulsión asfáltica, consiste en la disgregación de las capas asfálticas y parte de la base granular de un pavimento existente. Lo que se conoce como reciclaje a profundidad en sitio FDR (en inglés, full depth Reclamation) (Stroup-Gardiner, 2011).

Este método menciona la eventual adición de controladores de rotura, refiriéndose con esto, a los más utilizados: cemento, la cal hidratada y las cenizas volantes, cuyas características se deberán establecer en una especificación particular. Describe los posibles métodos a utilizar para el establecimiento del óptimo contenido de emulsión. Se puede utilizar el método de inmersión-compresión (Norma INV E-738-07), aplicándose los siguientes criterios como guía para la selección del óptimo contenido de ligante en la mezcla reciclada: resistencia de briquetas curadas en seco ≥ 2000 KPa y resistencia conservada tras curado húmedo $\geq 75\%$. Además, se puede diseñar por resistencia a la tracción indirecta o por módulo de rigidez, sin mencionar límites admisibles. El porcentaje óptimo de ligante residual será aquel que, cumpliendo las exigencias indicadas, consiga el valor máximo de resistencia tras curado húmedo.

Además, en materia de investigación, en la tesis de Juan Pablo Burbano en 2011 se ha trabajado en reciclaje en frío, evaluando la respuesta mecánica de muestras elaboradas con distintos tipos de RAP, con diferentes granulometrías, haciendo uso de una emulsión catiónica de rompimiento lento en 3 dosificaciones diferentes: 60, 75, 90 y 105 L/m³ (dosificaciones para mezclas estabilizadas en campo). Los resultados de ensayos de densidad, estabilidad - flujo, inmersión compresión y módulos de rigidez muestran que el RAP estabilizado con las dosificaciones usadas y con las granulometrías presentadas, no resultó ser un material apto para colocación en estructuras de pavimentos cuyos tráficos fueran medios y altos. Se recomienda utilizarse para tráficos bajos o como material granular de relleno protegido por una carpeta asfáltica (Burbano Carvajal and Zuluaga Astudillo, 2011).

2.8. Residuos Sólidos en Mezclas asfálticas

El reciclaje de materiales catalogados como “residuos” en mezclas asfálticas ha sido aplicado con resultados satisfactorios. Entre los residuos utilizados han sido el grano de caucho de llanta y las escorias de metales. Se ha evaluado la potencialidad del uso del caucho en las mezclas en frío con 100% agregado reciclado de pavimento asfáltico RAP obteniéndose que genera un incremento en su resistencia a la fatiga (Dondi, Tataranni, Pettinari, Sangiorgi, & Simone, 2014). Por otro lado, la escoria de acero ha mostrado prometedores resultados cuando ha sido utilizada en la producción de mezclas asfálticas en caliente como el incremento de la resistencia a la fatiga (Ahmedzade and Sengoz, 2009). En el estado del arte, las mezclas recicladas son reconocidas por ser una tecnología efectiva desde el punto de vista ambiental y de consumo de energía. Garantizando la sostenibilidad de nuestro sistema vial (Thanaya, Negara and Suarjana, 2014).

2.8.1. Caucho de llanta en mezclas asfálticas

El caucho reciclado de llanta está principalmente compuesto por: caucho natural y sintético, acero, fibra y carbón. El proceso de transformación del caucho de llanta consiste en disminuir su tamaño, mediante un proceso de trituración en el que es retirado cualquier constituyente distinto al caucho. En muchos casos si el caucho ha pasado por un proceso de vulcanización, aumentan notoriamente los enlaces que unen sus moléculas, haciéndolo más resistente (Nejad *et al.*, 2012).

En función del tipo de trituración: criogénica o temperatura ambiente, se genera un producto final con textura y forma diferente. En la primera previamente a la trituración, se enfría con nitrógeno líquido a una temperatura de - 80 grados Celsius, lo que produce un caucho de textura suave y baja área superficial, lo que disminuye la demanda de asfalto y por ende una mezcla más económica

El uso del caucho de llanta reciclado de llanta en pavimentación se inicia en la década de 1940 cuando una empresa de reciclaje de caucho de Estados Unidos comienza a comercializar un producto de caucho reciclado desvulcanizado, llamado Ramflex, como aditivo de partículas para la mezcla asfáltica. Más tarde a mediados de 1960 se desarrolló una mezcla asfáltica modificada por vía húmeda con grano de caucho Overflex (Sacramento Country, Bollard & Brennan, 1999; Cao, 2007a).

Existen dos procesos básicos para la incorporación del caucho reciclado de llanta a una mezcla asfáltica: vía húmeda y vía seca. La vía húmeda, se conoce a la modificación del asfalto con caucho, en el que el asfalto es adicionado al caucho antes de ser mezclado con los agregados, creando un asfalto modificado “asfalto-caucho”. En el caso de mezclas en caliente por vía húmeda, asfaltos modificados con caucho de llanta de molienda a temperatura ambiente, resultan con viscosidades más altas que los criogénicos con similares granulometrías, esto debido a que tienen mayor área superficial y forma irregular. Lo que facilita la reacción más rápida con el ligante (Nejad *et al.*, 2012).

El proceso en seco mostrado en la Fig 2.8-1, consiste en la cualquier método que incluye llantas de desecho como un sustituto de 1 a 3% del agregado en una mezcla de pavimento asfáltico, no como parte del aglutinante (State of California Department of Transportation, 2006) Este proceso tiene la ventaja de reciclar más cantidad de caucho que el proceso húmedo. Sin embargo, entre las recomendaciones que se tienen por vía seca, se recomienda que se adopten gradaciones menores a 0.6mm y que se limite el contenido de caucho a porcentajes inferiores a 3% del peso total de los agregados secos. La utilización de porcentajes inferiores a 3% ayuda a la compactación de la mezcla porque mejora la trabajabilidad (Pettinari and Simone, 2015).

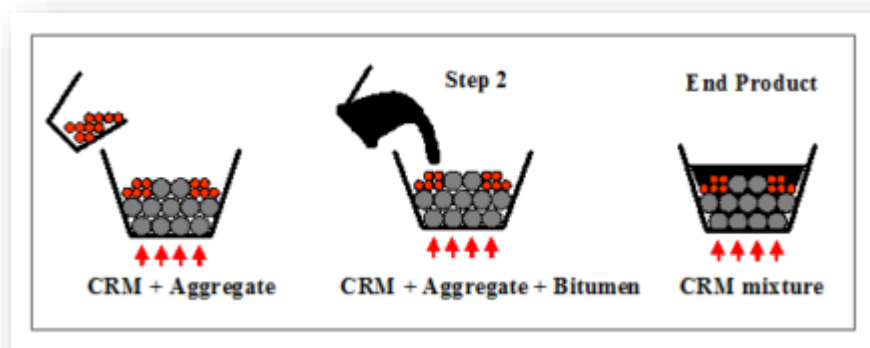


Fig 2.8-1. Método en seco para mezclas asfálticas con caucho. Fuente: Hassan et al., 2014

En el análisis de las propiedades mecánicas las principales preocupaciones desde el punto de vista mecánico de las mezclas en frío, involucran el comportamiento de rigidez de rigidez : evaluación

de la vida a fatiga y la resistencia a la deformación permanente (S. Lee, Akisetty and Amirkhanian, 2008; Quick and Spencer, 2011; Diefenderfer, Brian K; Apeagye, 2014). Al añadir el caucho de llanta reciclado, se han obtenido grandes avances en el mejoramiento de estas características en las mezclas en frío. La resistencia a la Fatiga ITFT, se incrementa considerablemente debido a que el caucho por sus propiedades elásticas, cuando la carga es aplicada, las partículas caucho absorben la energía del impacto mediante la deformación y después de la carga se libera la energía absorbida y en este proceso, este se recupera físicamente. Cuantitativamente, con la adición de 3% de caucho en seco, a una MRF se obtuvo un incremento del 73% del número de ciclos en la prueba de fatiga a la tracción indirecta (pasó de 55800 a 211000 ciclos) (Dondi *et al.*, 2014). Estas características elásticas del caucho son transferidas a la mezcla. Por esta razón se considera que este tipo de mezclas tiene potencial para solucionar problemas de deformaciones por ciclos de hielo-deshielo en pavimentos y pérdida de resistencia a la deslizamiento (Hassan *et al.*, 2014). Pero la falta de normatividad que permita asegurar un rendimiento adecuado de este tipo de mezclas ha causado que no sea muy aplicado por la industria y la investigación (Oruc, Celik and Akpinar, 2007; Hassan *et al.*, 2014).

2.8.2. Escorias de acero en mezclas asfálticas

En la industria de la Ingeniería Civil, se han desarrollado una serie de aplicaciones cuyo objeto principal es la utilización de subproductos industriales de la industria siderúrgica como la escoria de alto horno y la escoria de acero (Ahmedzade and Sengoz, 2009). La escoria de acero es un material duro, denso, resistente a la abrasión y de color oscuro. Compuesto principalmente por hierro libre, lo que la convierte en un material de alta densidad y dureza. Estas propiedades hacen que la escoria de acero sea un material particularmente adecuado utilizado en la construcción de carreteras (Behiry, 2013).

La escoria de acero puede ser de distintos tipos, en función del tipo de metal del que provienen: cobre, níquel, fósforo y zinc. Las escorias de fósforo se han utilizado en mezclas densas en caliente en Tennessee, donde los resultados mostraron que ayudó a mejorar y restaurar la resistencia al deslizamiento (National Cooperative Highway Research Program, 2013). Se ha demostrado a través de ensayos de estabilidad, que el uso de escoria de cobre en mezclas recicladas en un porcentaje de adición del 35% es favorable, porque los valores de flujo disminuyen y los valores de estabilidad aumentan. Esta mejoría también se refleja en el incremento de la resistencia a la tracción indirecta. Lo que se permite concluir que el uso de escoria de acero como una solución en aplicaciones con RAP para cumplir con requisitos de fatiga y tracción más exigentes (Raposeiras *et al.*, 2016).

Ahmedzade & Sengoz en 2009 estudiaron el reemplazo de escoria de acero por agregado grueso en mezclas en caliente y los resultados de la prueba del módulo de rigidez a la tracción indirecta mostraron que los valores de las mezclas que contienen escoria de acero, fueron mayores que las mezclas con agregado grueso de piedra caliza a todas las temperaturas de prueba, especialmente a 20°C (Ahmedzade and Sengoz, 2009). En términos de rigidez a la fluencia en el ensayo de Creep, las mezclas con agregado grueso de escoria de acero evidenciaron una mejor resistencia al ahuellamiento. Adicionalmente, el daño por humedad, analizado a través de las relaciones de

resistencia a la tracción indirecta, ha sido también disminuido con la adición de acero a las mezclas (Ahmedzade and Sengoz, 2009).

Con relación a la resistencia a la fatiga, se ha encontrado que las mezclas bituminosas con agregado de RAP y escoria de acero han presentado propiedades de fatiga y rendimiento mejorados en comparación con mezclas compuestas por un esqueleto de agregado virgen. En particular, el uso del 30% de escoria EAF (escoria de horno eléctrico) y el 20% del agregado RAP aumentó la vida de fatiga, expresada en términos de la deformación inicial pasó de 154% en las mezclas con agregado virgen a 191%.

2.9. Beneficios Ambientales de las mezclas con adición de residuos sólidos

Los pavimentos reciclados son a menudo denominados pavimentos sostenibles. Un pavimento sostenible es un pavimento económico, eficiente, seguro y especialmente que sea respetuoso con el medioambiente. Esto significa, que satisface las necesidades de los usuarios actuales sin comprometer los de las generaciones futuras (Alkins, Lane and Kazmierowski, 2008). El uso de materiales de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en mezclas asfálticas ha sido preferido en comparación con materiales vírgenes en diferentes países, por sus beneficios ambientales (Ameri and Behnood, 2012). Algunos de los beneficios ambientales que tienen las mezclas recicladas son (Alkins, Lane and Kazmierowski, 2008):

- Optimizar el uso de los recursos naturales.
- Reducir el consumo de energía.
- Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (limitar la contaminación).
- Mejorar la salud, la seguridad y la prevención de riesgos.
- Garantizar un alto nivel de comodidad y seguridad para el usuario.

El CIR se ha utilizado ampliamente como un método de rehabilitación rentable y sostenible para pavimentos severamente dañados en los últimos años (Gao, Ni, Charmot, *et al.*, 2014). Debido a los ahorros económicos y energéticos que representa que no se requiere calentamiento, todas las operaciones desde la molienda del pavimento, aplicación del agua, la emulsión, extensión y compactación, se realizan sin necesidad de calentamiento (Martínez-Echevarría *et al.*, 2012). En este mismo sentido, desde el punto de vista ambiental y económico, el uso de material como caucho de llanta reciclado, permite resolver el problema de la eliminación de residuos y mejorar la calidad de los pavimentos (Nejad *et al.*, 2012).

Las técnicas de reciclaje ofrecen ventajas ambientales en comparación con la reconstrucción tradicional (mezclas vírgenes en caliente). El reciclaje se ha demostrado que disminuye las emisiones de CO₂-eq / carril-km en 75%. Esto se debe principalmente a que se reduce el consumo de materiales vírgenes y además el hecho de que la producción en el lugar de las mezclas basadas en reciclaje (FDR, CCPR y CIR) está incluida en la fase de construcción, en cambio la reconstrucción, involucra adicionalmente la extracción y producción de materiales (Santos *et al.*,

2015). En esta tesis se realizó un análisis de los beneficios ambientales del reciclaje con emulsión además de la utilización del caucho de llanta reciclado en MRF. Este análisis se realizó con ayuda de la herramienta PaLATE que a continuación será definida.

2.9.1. PaLATE

PaLATE (Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects (PaLATE)), es un modelo ambiental y económico diseñado en Excel para aplicaciones en pavimento. A través de la herramienta PaLATE se puede obtener un análisis del ciclo de vida que se basa en información ambiental y económica para evaluar el uso de diferentes materiales, incluidos materiales reciclados, en la construcción y mantenimiento de pavimentos. PaLATE evalúa las emisiones asociadas con la producción de materiales, la construcción, el transporte y el mantenimiento del pavimento. Además, incorpora información sobre el uso de materiales tanto vírgenes como reciclados (asfalto recuperado y concreto, ceniza volante de carbón, ceniza de carbón, escoria de alto horno, vidrio, caucho de llanta) (Horvath, 2003).

PaLATE estima el consumo de energía y las emisiones de CO₂, NO_x, PM₁₀, SO₂, CO e informa las emisiones promedio de lixiviados para diferentes materiales de construcción. Los efectos son para las etapas de construcción inicial, mantenimiento y total se presentan en gráficos de barras. Además, se tienen en cuenta los efectos de los procesos de transporte y producción de materiales por separado.

3. Materiales y Caracterización de los Materiales

Los materiales utilizados en el desarrollo de la siguiente tesis fueron: pavimento asfáltico reciclado, emulsión asfáltica, caucho de llanta y calamina. El agregado reciclado, fue caracterizado en términos de su distribución granulométrica y la emulsión asfáltica, de acuerdo a su estabilidad. El caucho fue donado por la empresa MPI Ltda. La calamina fue donada por la empresa de recolección de residuos Triple A S.A E.P.S. Estos dos residuos fueron caracterizados en términos de sus características físicas: granulometría y sus características químicas, a través de ensayos de microscopía de barrido SEM y análisis de composición elemental.

3.1. RAP Pavimento asfáltico reciclado

El RAP utilizado en esta investigación proviene de fresado de la Vía Circunvalar con carrera 27, esta vía pertenece a la localidad Suroccidente, de la ciudad de Barranquilla. En el indicador color rojo de la Fig 3.1-1. En obras de rehabilitación realizadas en esta vía en el año 2015, fue removido un espesor de aproximadamente 5cm. La capa original, de acuerdo con el proyecto, se compone de una mezcla densa en caliente, con tamaño máximo de partícula 12,7 mm, con un asfalto de penetración 60/70. Los trabajos más recientes de rehabilitación sobre el pavimento se realizaron aproximadamente en el año 2007, por lo tanto, el asfalto se podía considerar como envejecido. Las partículas de RAP se encuentran formadas por partículas en la que se distinguen tres posibles estados: partículas formadas por solo asfalto envejecido y finos, partículas de agregados parcialmente cubiertas por asfalto envejecido y partículas casi totalmente descubiertas

Se recogieron cerca de 300 kg de material fresado en el sitio y se transportaron al laboratorio. El material fue secado al aire libre, tamizado y separado en fracciones para facilitar su manipulación a la hora de fabricar las mezclas. Los tamices utilizados para la separación del material en tres fracciones fueron: fueron 4,75mm, 12,7mm y 19mm, como se observa en la Fig 3.1-2;[Error! No se encuentra el origen de la referencia..](#)

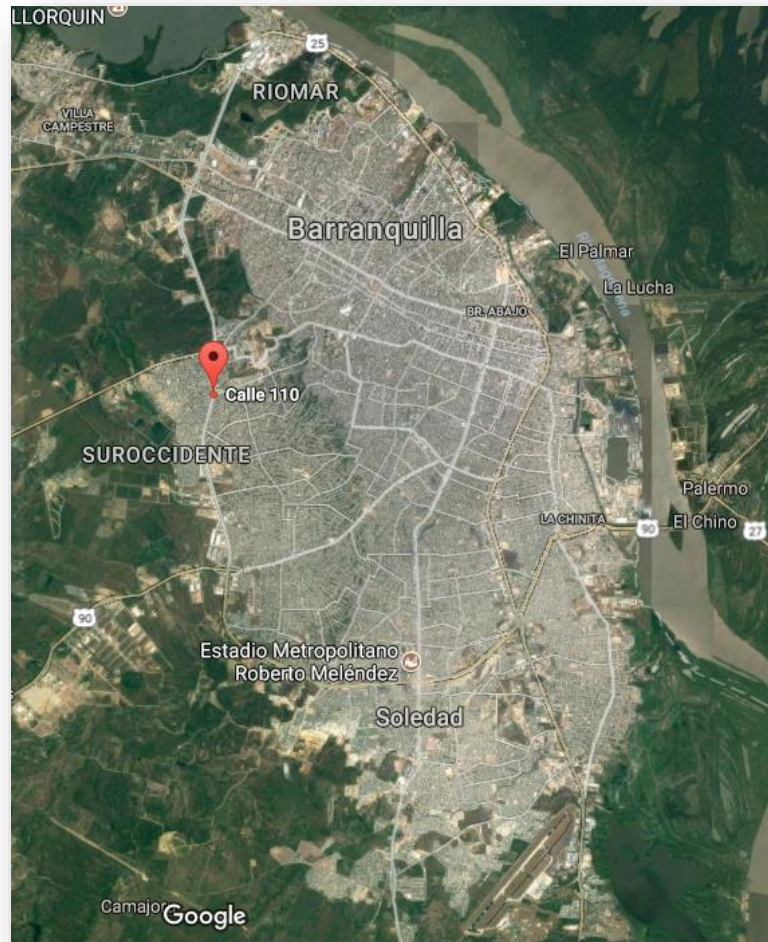


Fig 3.1-1. Ubicación del punto fresaado de la circunvalar con carrera 27, (Google Maps, 2015).

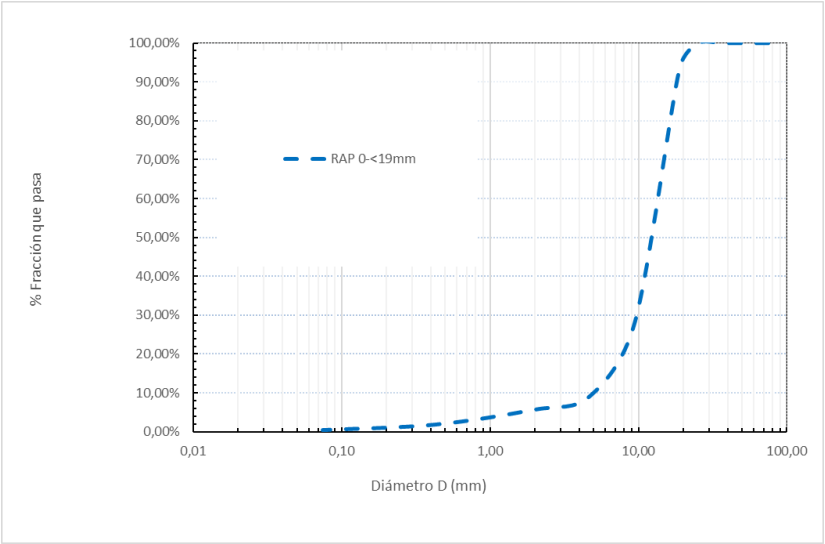


Fig 3.1-2. Pavimento asfáltico reciclado, subdividido en función de su tamaño.

3.1.1. Granulometría del RAP INV E 213-13

El RAP está constituido por partículas de tamaño entre 19mm hasta tamaños inferiores a 0,075mm, con una poca cantidad de finos <2% debido a que el filler se encuentra contenido en lo que se conoce como el “mastic” que es la pasta de asfalto y finos. La granulometría de estas partículas se realizó por medio del tamizado con lavado para obtener la distribución granulométrica del material, la cual es la mostrada en la [Fig 3.1-3. Granulometría RAP original](#).

[Fig 3.1-3](#). A su vez, fue subdividido por tamaños para facilitar su manejo y almacenamiento en el laboratorio y a cada subgrupo se aplicó el mismo procedimiento de tamizado, estas granulometrías se muestran en la Fig 3.1-5. La gradación del RAP, puede verse afectada por la operación del fresado, la composición del asfalto existente, la temperatura del asfalto en el pavimento fresado, la profundidad que se fresó, la rapidez de la maquina encargada, el tipo y condición de la herramienta además de la dirección del corte (Wirtgen GmbH, 2012).



Tamiz (mm)	Pasante [%]
25	100%
19	94%
9,5	34%
4,75	13%
2	8%
0,425	2%
0,075	1%

Fig 3.1-34. Granulometría RAP original.

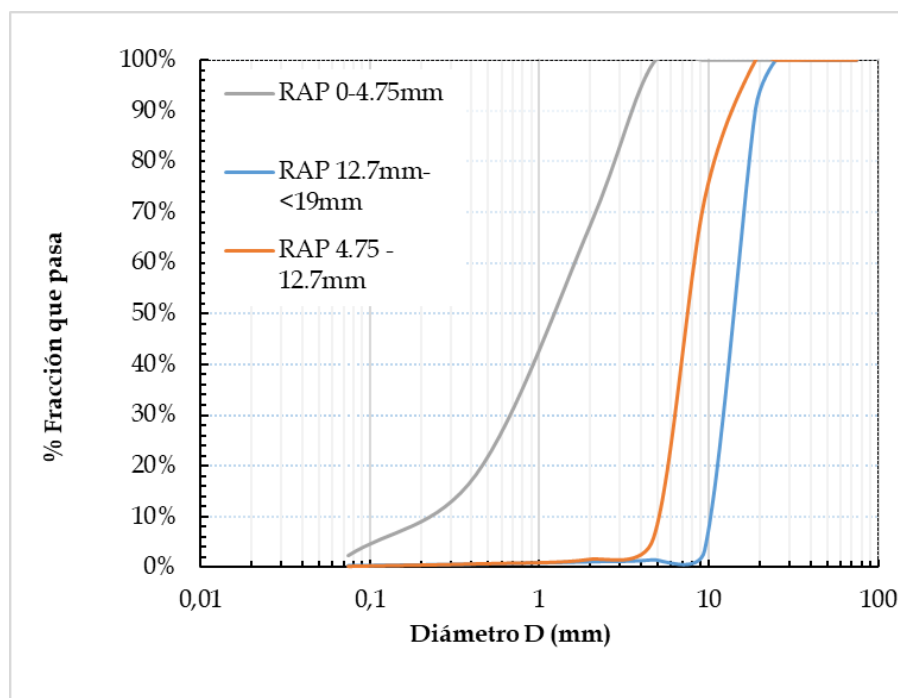


Fig 3.1-45. Granulometría del RAP dividido en fracciones.

3.1.2. Evaluación del contenido de asfalto en el RAP: INV E 732-13.

El contenido de asfalto en el RAP fue medido por el método de la centrífuga. Se seleccionaron 3 muestras por cada prueba de aproximadamente 1kg en la máquina centrífuga, mostrada en la [Fig 3.1-6](#)~~Fig 3.1-5~~. Este equipo, está provisto de una taza para colocar la muestra y un desagüe para remover el solvente. Para extraer cuantitativamente el asfalto envejecido en el RAP, la cantidad de asfalto viene de la diferencia entre los pesos antes y después de la extracción. En promedio el RAP utilizado contenía 5,63% de asfalto.

Tabla 3.1-1. Contenido de Asfalto en el RAP.

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Asfalto en el RAP (%)	5,58	5,72	5,58	5,63



Fig 3.1-56. RAP en el equipo centrífuga para extracción del asfalto adherido.

3.1.3. Gravedad específica (SH) Secado al horno, en condición saturada y superficialmente seca SSS y gravedad específica aparente

A tres muestras de rap, se le halló la gravedad específica y absorción en función de la gradación. Para el agregado grueso se utilizó el método de la canastilla sumergida (INV 223 - 13) y para los finos el método del picnómetro con agua (INV 222 - 13), como se observa en la [Fig 3.1-6](#). Todo lo anterior de acuerdo con la normativa INVIAS. Los resultados se presentan en la [Tabla 3.1-2](#).

Tabla 3.1-2. Gravedad específica y absorción del RAP por fracción.

Gradación del RAP	Norma	Gravedad específica seca en horno G_{SH}	Gravedad específica en condición saturada y superficialmente seca G_{SSS}	Gravedad específica aparente G_a	Absorción [%]
0-4,75mm	INV 222 - 13	2,318	2,363	2,429	1,97
4,75-12,7mm	INV 223 - 13	2,409	2,443	2,493	1,39
12,7-19mm	INV 223 - 13	2,301	2,348	2,416	2,07

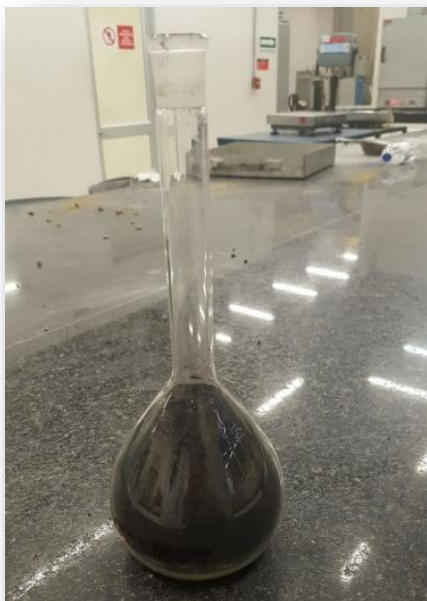


Fig 3.1-67. Picnómetro con RAP fino, para ensayo de gravedad específica y fracción gruesa de RAP en condición SSD para ensayo de gravedad específica.

3.2. Emulsión asfáltica

La emulsión asfáltica mostrada en la Fig 3.2-1, donada por la empresa de asfaltos MPI Ltda es una emulsión de rompimiento lento, cuyas características se muestran en el ficha técnica suministrada por la empresa fabricante ubicada en los anexos en la Fig 10-9. Además, fue caracterizada en laboratorio en función de su estabilidad al almacenamiento, tamizado y pH y características del asfalto residual: punto de ablandamiento y penetración.



Fig 3.2-1. Emulsión asfáltica añadida a la mezcla

Las siguientes propiedades de la emulsión fueron determinadas en laboratorio y se explicarán una por una a continuación:

3.2.1. Residuo por evaporación de la emulsión asfáltica INV E 771- 13

Se determinó de manera cuantitativa el contenido de asfalto residual de la emulsión asfáltica por evaporación a 163 °C (ver Fig 3.2-2). El procedimiento consiste en dejar evaporar a esta temperatura, por aproximadamente 2 horas, una muestra de 50 gramos de emulsión. El resultado obtenido se da en porcentaje con respecto a la masa total de emulsión.

$$\text{Residuo [\%]} = 2 * \frac{(A - B)}{C} * 100$$

Dónde A, es la masa del recipiente más el residuo, B es el peso del recipiente y C es la masa de la muestra de emulsión.



Fig 3.2-2. Vaso de precipitado con emulsión para evaporar en horno a 163°C.

3.2.2. Tamizado de la emulsión INV E 765-13

Se determinó la proporción de partículas de asfalto, retenidas en el tamiz de 850 µm (No.20), que contiene una muestra de emulsión asfáltica de 800 a 1000. Esto se obtiene al tamizar tres muestras de la emulsión por la malla No. 20 (previamente pesada) y se determina la masa retenida.

$$\text{Masa retenida [\%]} = \frac{B - A}{10}$$

B = masa del conjunto tamiz, residuo y fondo.

A = masa del tamiz y el fondo.

$$\text{Masa retenida} = 0,1\%$$

3.2.3. Potencial de hidrógeno INV E 768-13

Se obtuvo el potencial de hidrógeno de la fase acuosa de la emulsión. El procedimiento consiste en trabajar con aproximadamente 50 ml de emulsión. El pHmetro, previamente lavado por agua destilada, se sumerge en el recipiente con la muestra, se agita ligeramente el recipiente, se esperan unos segundos hasta que alcance el equilibrio, y se toma el valor obtenido (ver Fig 3.2-3). El procedimiento se realiza tres veces, con el fin de obtener tres mediciones de pH. Los resultados se consideran aceptables, si la diferencia entre los valores de pH1 y pH3 no exceda 0,2 unidades.

$$pH = 2,65 \text{ a } 21,5^{\circ}\text{C}.$$

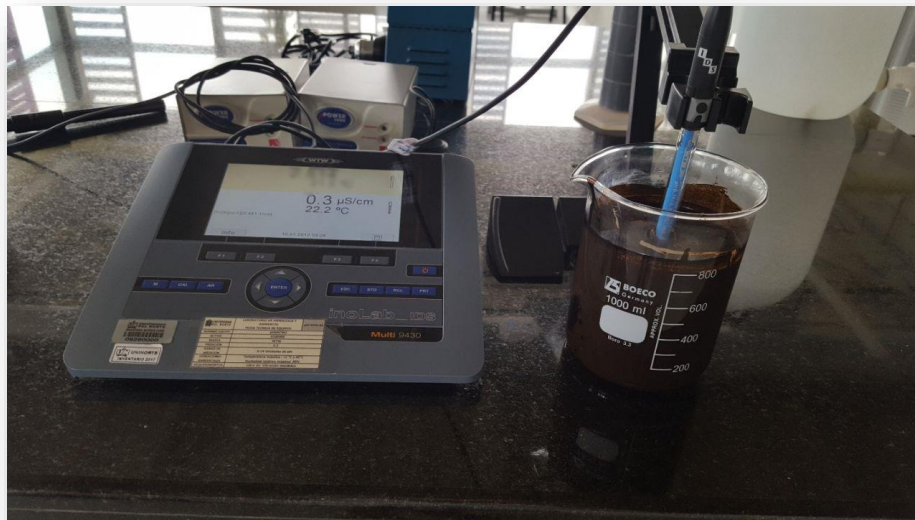


Fig 3.2-3. Electrodo de pHmetro sumergido en beaker con emulsión para la medición del potencial de hidrógeno.

3.2.4. Sedimentación a 5 días INV E 764-13

Se analizó la capacidad de la emulsión asfáltica para permanecer como una dispersión uniforme durante el almacenamiento. El procedimiento se desarrolla iniciando con la preparación de una muestra de la emulsión para una probeta de 500 ml, la muestra es tapada herméticamente y se deja en completo reposo por un tiempo determinado dentro de la probeta (ver Fig 3.2-4). En la presente tesis se tomaron datos a partir de 5 días de reposo de la muestra. Se realiza la extracción con una pipeta, en la parte superior e inferior, aproximadamente 55 ml de muestra sedimentada. Se determina el porcentaje de asfalto residual que hay en la parte superior e inferior de la probeta y la sedimentación es la diferencia entre ambos porcentajes.

$$\text{Sedimentación } [\%], 5 \text{ días} = R_i - R_s$$

R_i y R_s son los porcentajes de residuo en la parte inferior y superior de la probeta.

$$\text{Sedimentación } [\%], 5 \text{ días} = 0,5\%$$



Fig 3.2-4. Probeta 1 de 3 de ensayo de sedimentación a 5 días.

3.2.5. Índice de Penetración del asfalto residual de la emulsión

El índice de penetración, proporciona una medida del grado de susceptibilidad térmica de los materiales asfálticos. Este fue concebido por Pfeiffer y Van Doormal y se calcula a partir de la penetración a 25° y el punto de ablandamiento. El valor obtenido de -0,5 es usual para asfaltos convencionales. Para el residuo de la emulsión utilizada se calculó en la Tabla 3.2-1.

$$IP = \frac{20 - 10f}{1 * f}$$

$$f = \frac{50 * \log \left[\frac{800}{P} \right]}{TAB - 25}$$

Tabla 3.2-1. Índice de penetración del asfalto de la emulsión.

P [dmm]	60
TAB [°C]	51,60
f	2,11
IP	-0,54

Penetración INV E 706-13

Se determinó de la consistencia del asfalto de la emulsión. El procedimiento consistió en llenar tres recipientes para la realización de tres pruebas del ensayo. Si es necesario se agita la muestra con el fin que se homogenice sacar las burbujas de aire en las muestras. Las muestras se acondicionan en una cámara ambiental a una temperatura de 25°C por un tiempo aproximado de dos horas. Se mide la penetración de una masa de 100g de una aguja con la muestra por medio de un Penetrómetro (ver Fig 3.2-5). Sobre cada muestra, se toman tres valores de penetración, que deben tener un distanciamiento del uno con el otro de mínimo 1 cm. Se espera que la penetración de cada prueba sea mayor entre 60 y 70 décimas de mm.

$$P[dmm] = 60$$



Fig 3.2-5 Ensayo de penetración al asfalto residuo de la emulsión.

Punto de ablandamiento (aparato de anillo y bola) I.N.V. E - 712 - 07

La muestra por ensayo, se preparó fundiendo dos discos horizontales de asfalto entre dos anillos de bronce. Se calentaron a una tasa de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ en un baño de agua (Fig 3.2-6). Mientras cada uno de ellos soporta una bola de acero. Se midió el punto de ablandamiento como el promedio de las temperaturas a las que los dos discos se ablandan, permitiendo que cada bola caiga una distancia de 25mm. Se realizaron 3 repeticiones del ensayo y la temperatura se midió con aproximación de 0.2°C .

$$TAB = 51,6^{\circ}$$



Fig 3.2-6. Ensayo de punto de ablandamiento al asfalto residuo de la emulsión.

3.3. Caucho de llanta CR

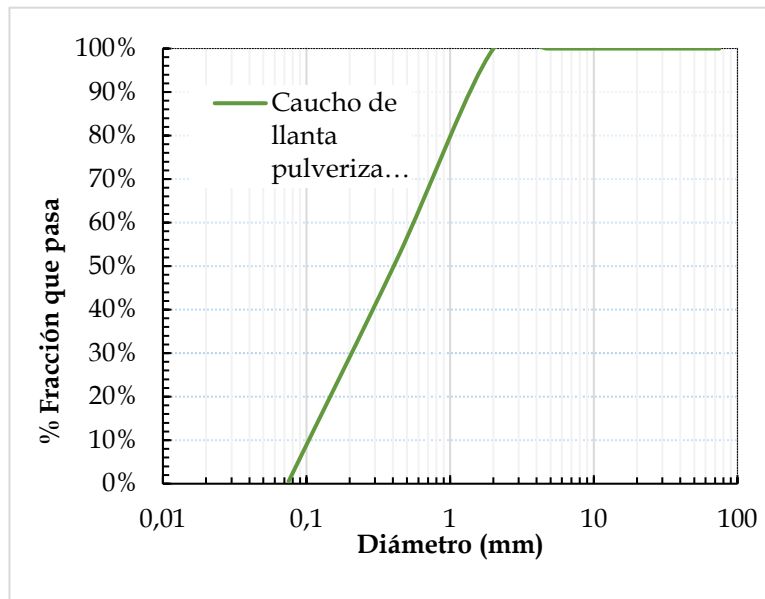


Fig 3.3-1. Caucho de llanta.

El caucho proviene de las llantas recicladas, alrededor de un 60% de su composición son cauchos naturales o sintéticos. El caucho utilizado en esta investigación, proviene de trituración mecánica, obtenido de la empresa colombiana MPI Ltda Fig 3.3-1 . El material es granular, con tamaño máximo de 0.425mm, se obtuvo la distribución granulométrica, mostrada en la [Fig 3.3-2](#)~~Fig 3.3-2~~ . El tamaño de las partículas, es un factor importante en la mezcla en frío porque el caucho por procesos en seco, hace parte de los agregados. Para conocer su composición química, se realizó un análisis con espectrometría con dispersión de energía de rayos X (EDS), el cual introduce una dispersión de energía de rayos X, para identificar la composición elemental de la muestra, a partir de un análisis de imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM). En la [Fig 3.3-3](#)~~Fig 3.3-3~~ se muestra la composición química del caucho y una imagen microscópica a escala 500X. El caucho de llanta utilizado para fines de pavimentación, está constituido principalmente por carbono más del 80% ([Fig 3.3-3](#)~~Fig 3.3-3~~) y en orden descendente otros componentes como el oxígeno, silicio, azufre, calcio, y zinc (Xiao, Putman and Amirkhanian, 2006).

Granulometría y composición química del caucho de llanta

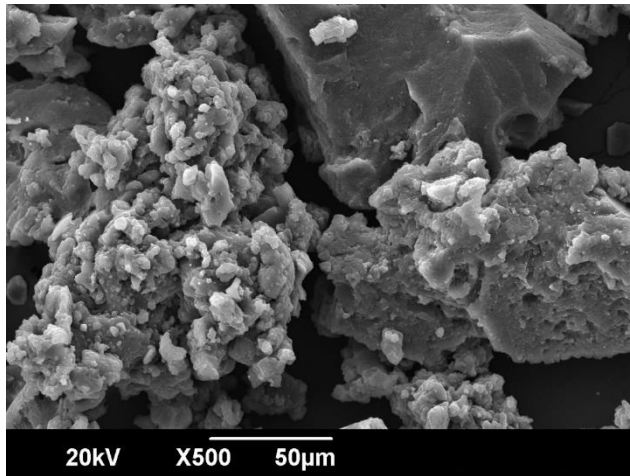
Como se observa en las figuras, el caucho de llanta es un material pulverizado con tamaño máximo de 2mm, el cual se encuentra compuesto mayormente por CaCO_3 (81,47%). Posee una textura granular que se caracteriza por el proceso de trituración a temperatura ambiente (Pettinari *et al.*, 2014). Los resultados de composición química provienen de un análisis elemental a través de una microscopia de barrido SEM. El ensayo de microscopía de barrido SEM consiste en la aplicación de un barrido de haz de electrones sobre la muestra, esta debe previamente estar cubierta por una capa muy fina de oro o carbón en el caso de que no sea conductora para otorgarle esta propiedad (Quintero Lemus and Gallardo Amaya, 2015). Este ensayo, se complementa con un detector de energía dispersiva de rayos X (EDS) que detecta los rayos X generados en la muestra y permite realizar un análisis espectrográfico de la composición elemental en su superficie de un área o un punto.(elementos pesados y livianos a partir del carbono) (González, Pachón and Pulido, 2017). De este análisis se obtienen las gráficas como la mostrada en la [Fig 3.3-2](#).



Gradación del caucho de llanta

Tamiz (mm)	Pasante [%]
25	100%
19	100%
9,5	100%
4,75	100%
2	51,47%
0,425	0,54%
0,075	0%

Fig 3.3-2. Granulometría del caucho de llanta.



Composición química polvo de llanta		
Componente		%
C	CaCO ₃	81,47
O	SiO ₂	9,00
Al	Al ₂ O ₃	0,78
Si	SiO ₂	1,21
S	FeS ₂	2,34
Ca	CaSiO ₃	0,58
Fe		2,21
Zn		2,4
Total		99,99

Fig 3.3-3. Imagen del caucho de llanta en microscopía de barrido electrónico y composición química elemental.

3.4.Calamina CA

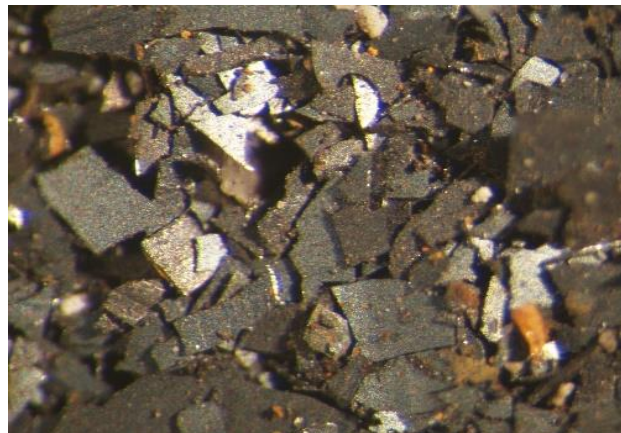


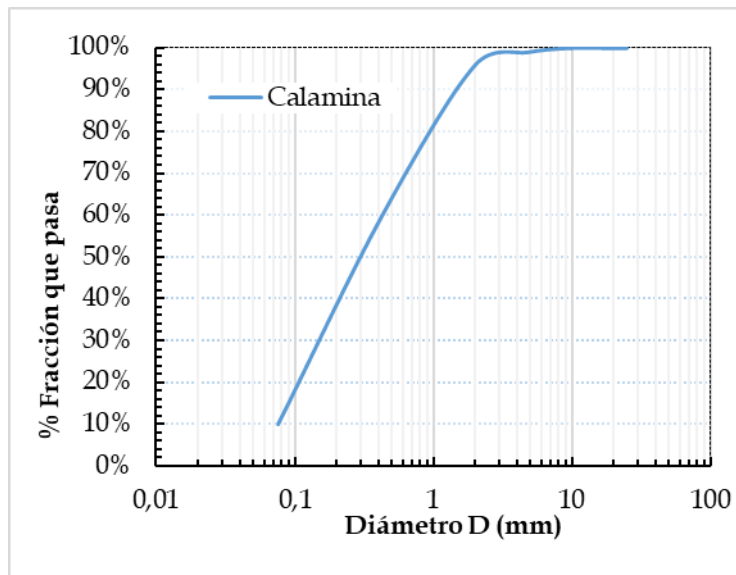
Fig 3.4-1. Apariencia de la calamina microscopio óptico 20X.

La calamina mostrada en la Fig 3.4-1 es un sólido fino homogéneo granular de color gris, rojo o negro, sin olor. Se genera en el proceso de trefilado, enderezado, figurado y entorchado de aceros (Ferrasa, 2015). Este material tiene propiedades aprovechables, desde el punto de vista químico, mineralógico y morfológico, que le confieren características que son productivas dependiendo de la aplicación en la que se use (Yildirim & Prezzi, 2015). Debido a su composición química, es un

material de gran estabilidad volumétrica además, debido a su morfología y mineralogía, tiene características friccionantes (Juckes, 2003). El material es granular, con tamaño máximo de 0,425mm, se obtuvo la distribución granulométrica, mostrada en la [Fig 3.4-2](#) y la composición elemental evidencia que es mayormente hierro porque su contenido es de 71,93% ([Fig 3.4-3](#))

Granulometría y composición química de la calamina

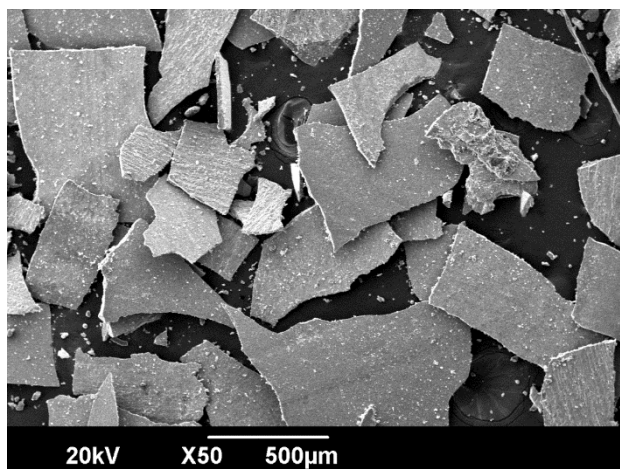
Como se observa en las figuras [Fig 3.4-2](#) y [Fig 3.4-3](#), la calamina es un material pulverizado con tamaño máximo de 2mm, el cual se encuentra compuesto mayormente por Fe (71,93%) luego de un análisis elemental de una microscopia de barrido SEM.



Gradación de la Calamina

Tamiz (mm)	Pasante [%]
25	100%
19	100%
9,5	100%
4,75	99%
2	96%
0,425	60%
0,075	10%

Fig 3.4-2. Granulometría de la Calamina.



Composición química de la calamina		
Componente		%
C	CaCO ₃	3,81
O	SiO ₂	21,76
Si	SiO ₂	2,5
Fe		71,93
Total		100,000

Fig 3.4-3. Imagen del caucho de llanta en microscopía de barrido electrónico y composición química elemental.

4. Programa Experimental

El programa experimental total está diseñado para evaluar el rendimiento general de las mezclas recicladas en frío con emulsión asfáltica. Esto se llevó a cabo siguiendo la normativa colombiana INVIAS y la europea EN. El objetivo principal es diseñar una mezcla reciclada en frío con emulsión asfáltica y analizar la influencia en el comportamiento mecánico, de rigidez de rigidez y volumétrico de las mezclas con distintas dosificaciones de caucho y de calamina.

En la etapa preliminar del estudio, se optimizaron los fluidos: contenido de agua a través del ensayo de compactación modificado y el contenido de emulsión a través del ensayo de resistencia a la tracción indirecta y los módulos a tracción indirecta a 4 frecuencias: 0.5, 1, 2 y 4Hz y tres temperaturas 5, 25 y 40°C.

Con los contenidos óptimos de agua y emulsión, se estudió el efecto de los residuos sólidos a añadir a la mezcla: caucho de llanta y calamina. Para el caso del caucho se utilizaron dos contenidos de emulsión 3,2 (óptimo) y por encima del óptimo 3,45%, teniendo en cuenta el posible aumento de la demanda por el reemplazo del RAP por el caucho cuya textura superficial. A través de los ensayos SEM se encontró que el caucho por ser proveniente de trituración a temperatura ambiente posee una textura rugosa que incrementa la demanda de asfalto. Este tipo de residuos se ha analizado, en función de la variación de su dosificación en la mezcla. Los porcentajes definidos se calculan con respecto al peso seco del RAP. En total, se fabricaron 6 tipos de mezcla con CR y 2 tipos de mezclas con CA. La identificación de cada una de las mezclas anteriormente descritas se encuentra en la Tabla 4-1.

Para la definición de los porcentajes utilizados en la mezcla se realizó primeramente una revisión de la literatura, teniendo en cuenta que han sido probados para el caucho en mezclas en frío recicladas, porcentajes que van desde 1 a 5% (Pettinari *et al.*, 2013; Pettinari and Simone, 2015). Considerando que el incremento del CR disminuye la resistencia, se han limitado a porcentajes por debajo del 3% (Dondi *et al.*, 2014). Adicionalmente la trabajabilidad reducida aparece si se adopta más del 3% de caucho (Pettinari and Simone, 2015). Posteriormente, se realizó una prueba piloto en la que el contenido más alto de caucho utilizado fue 1,5%. De este proceso se obtuvo que la resistencia a la tracción indirecta pasó de 220kPa en la mezcla sin caucho a 120kPa en la mezcla con 15% de CR. Y el módulo a tracción indirecta pasó de 1517,5MPa a 1158,3MPa, es decir disminuyó 45% y 24% (Castro, Martinez and Fuentes, 2016).

Finalmente, la definió que se los residuos fueran añadidos en seco, reemplazando una proporción de los agregados, en las siguientes dosis:

- Caucho: 0.25, 0.5 y 0.75%.
- Calamina: 1 y 3%.

El programa experimental mostrado en la [Tabla 4-2](#) contiene la descripción del programa y los ensayos y los estándares utilizados se presentan en la [Tabla 4-3](#).

Tabla 4-1. Nomenclatura utilizada para identificación de las mezclas

Fase	No. De niveles	Abreviatura	Composición de la mezcla
Optimización del contenido de emulsión e influencia del cemento	6	1C_0EM	1% cemento 0% emulsión
		0C_3,2EM	0% cemento 3,2% emulsión
		2,4EM_1C	2,4% emulsión 1% cemento
		3,2EM_1C	3,2% emulsión 1% cemento
		4,0EM_1C	4% emulsión 1% cemento
		4,8EM_1C	4,8% emulsión 1% cemento
Influencia del caucho y la emulsión en la mezcla*	6	3,2EM_0,25CR	3,2% emulsión 0,25% caucho
		3,2EM_0,5CR	3,2% emulsión 0,50% caucho
		3,2EM_0,75CR	3,2% emulsión 0,75% caucho
		3,45EM_0,25CR	3,45% emulsión 0,25% caucho
		3,45EM_0,5CR	3,45% emulsión 0,50% caucho
		3,45EM_0,75CR	3,45% emulsión 0,75% caucho
Influencia de la calamina en la mezcla*	2	3,2EM_1CR	3,2% emulsión 1% calamina
		3,2EM_3CR	3,2% emulsión 3% calamina

*Todas las mezclas con caucho y calamina tienen 1% de cemento.

Tabla 4-2 Plan experimental

Variable	No. De niveles	Descripción
Fuentes del RAP	1	Máximo tamaño nominal 19 mm
Gradación	1	Filler: 5% (RAP100%:filler5%),
Tipo de emulsión asfáltica	1	CRL-1
Propiedades de la emulsión	1	%Bitumen: 62,1
Contenidos de emulsión	4	2.4%, 3.2%, 4.0% y 4.8%
Contenido de cemento	1	1%(masa de RAP) para todas las mezclas
Tipos de caucho	1	Máximo tamaño nominal 1mm
Contenidos de caucho	3	0.25%, 0.50%, 0.75% (masa de RAP)
Tipos de Calamina	1	Proveniente de Triple A S.A E.P.S
Contenidos de Calamina	2	1%, 3% (masa de RAP)
Esfuerzo de compactación	3	75 golpes por cara, Compactador Marshall 180 Giros, 600kPa, 1.25°, Compactador Giratorio
Condiciones de curado	3	3 días a 40°C en horno
Condiciones de saturación	1	24h de inmersión en agua a 25°C
Pruebas mecánicas		
Módulo de rigidez en la modalidad de tracción indirecta*	3	3 temperaturas (5, 25 and 40°C), 3 frecuencia(0.5, 1, 2 y 4 Hz)
Prueba de Creep*	1	100kPa, 40°C
Resistencia a la tracción indirecta*	2	Seco y húmedo a 25°C

*3 réplicas por cada prueba

Tabla 4-3. Lista de ensayos y normas utilizadas.

Ensayo	Acrónimo	Norma
Caracterización mecánica		
Módulo a tracción indirecta	ITSM	UNI EN 12697- 26 ANX C (2012)
Resistencia a la tracción indirecta	ITS	UNI EN 12697-23
Resistencia a la deformación permanente - Creep	Creep	UNI EN 12967 – 25 Test Method A - Uniaxial
Resistencia retenida a tracción indirecta TSR[%]	-	INV E 725-13
Caracterización volumétrica		
Gravedad específica bulk	Gmb	INV E 733 (2013)
Gravedad específica aparente	Gsa	-
Gravedad específica máxima	Gmm	INV E 735 (2013)
*3 réplicas por cada prueba		

4.1. Protocolo de fabricación de los especímenes

El procedimiento de mezclado debe garantizar, el pre-humedecimiento del RAP previa a la aplicación de la emulsión para evitar su acelerado rompimiento, dispersión total de la emulsión para evitar cúmulos de asfalto y homogeneidad en la mezcla para garantizar que los especímenes sean lo más uniformes posibles. Los especímenes se fabricaron de tamaño de 100 milímetros de diámetro por unos 63mm de altura. En esta sección se describe ampliamente, cómo se realizó el proceso de fabricación de los especímenes teniendo en cuenta el mezclado, la compactación y el curado. De manera global, en la [Fig 4.1-1](#) ~~Fig 4.1-1~~, se describe el proceso de fabricación de los especímenes.

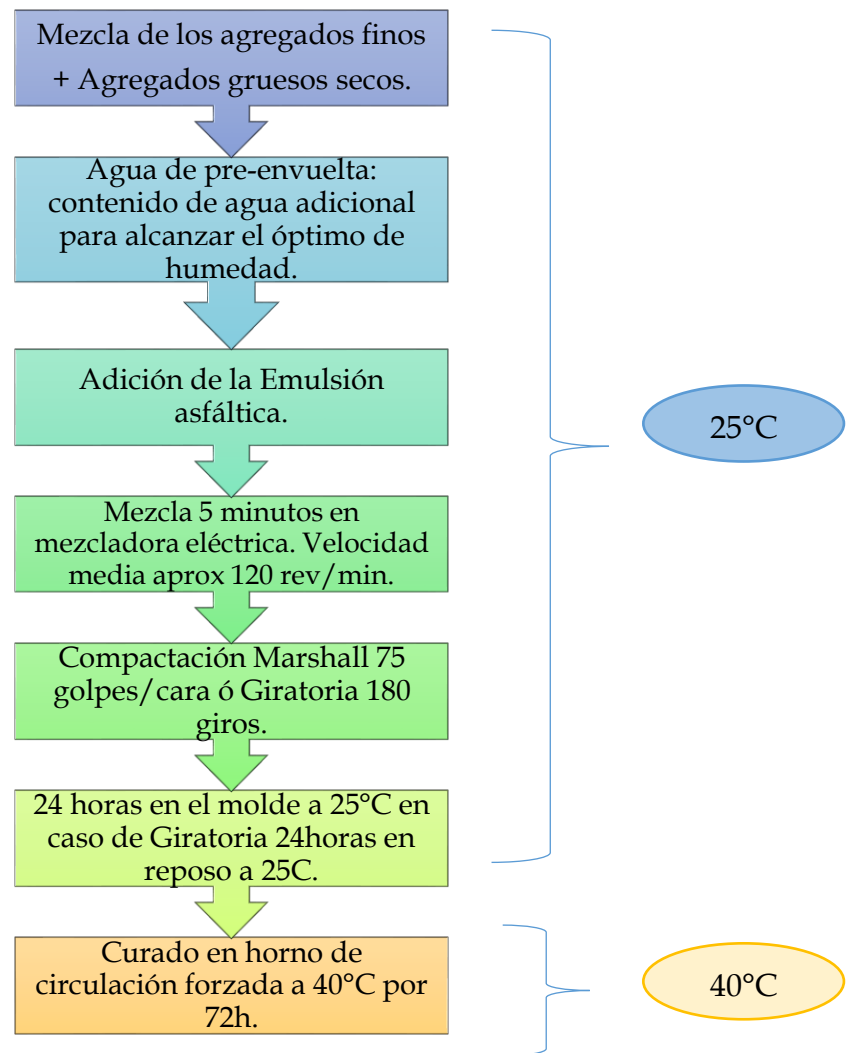


Fig 4.1-1 Diagrama de flujo con procedimiento de fabricación de los especímenes en laboratorio.

4.1.1. Procedimiento de Mezclado

El procedimiento de mezclado inicia cuando se mezclan los agregados secos, luego se mezclan con el agua de prehumedecimiento y finalmente se le agrega la emulsión asfáltica, como se muestra en la Fig 4.1-2. Se utilizó una mezcladora planetaria con capacidad de 10L, que está provista de un recipiente de acero inoxidable dentro de la cual se mueve una hélice del mismo material cuya velocidad de rotación puede graduarse, mostrada en la Fig 4.1-3.

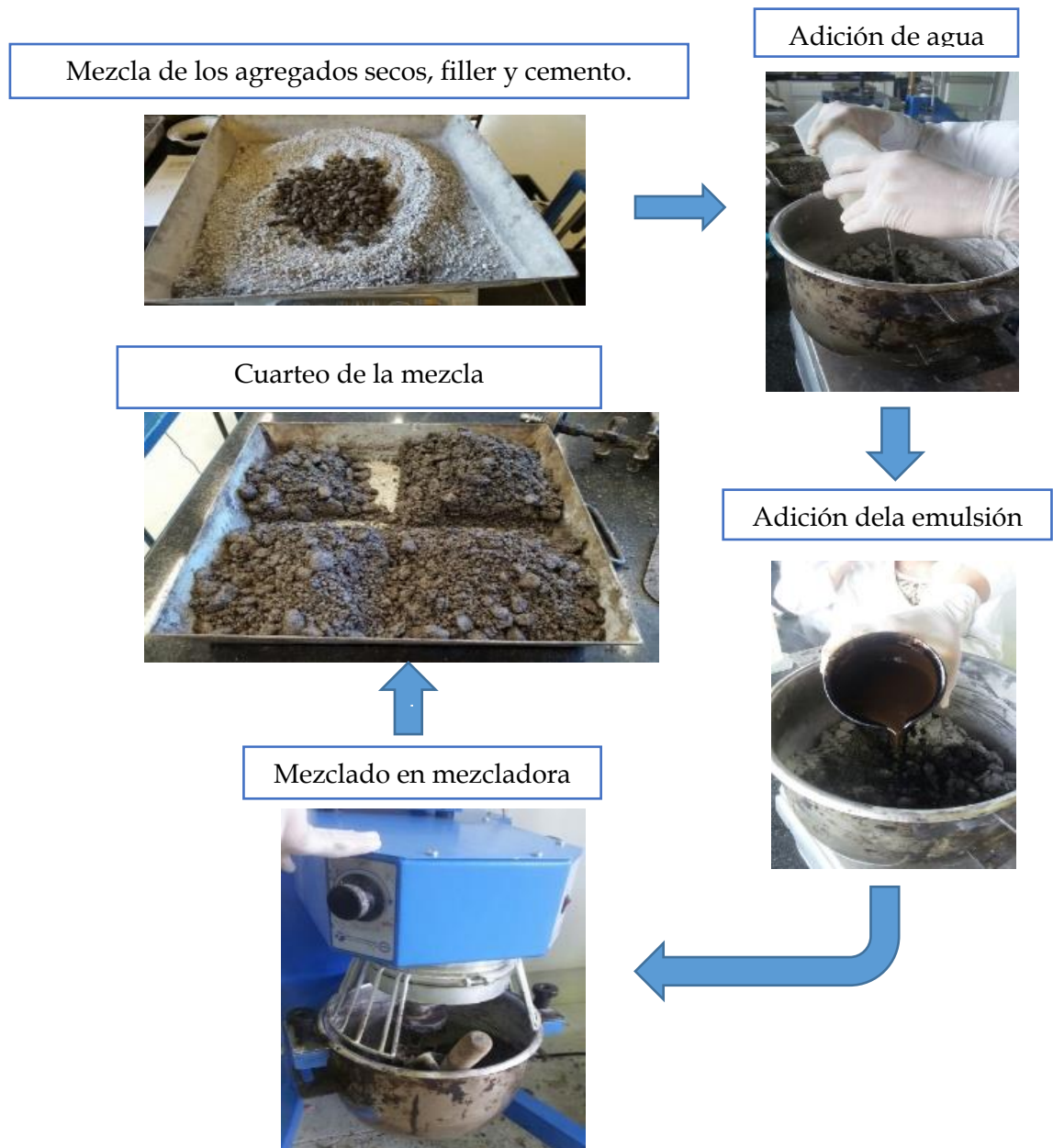


Fig 4.1-2 Procedimiento de mezclado.



Fig 4.1-3. Mezcladora planetaria con capacidad de 10L

El mezclado se realizó a velocidad media (aprox. 120rev/min) y temperatura del laboratorio (25°C). El mezclado en mezclas recicladas con emulsión asfáltica, es básicamente un proceso húmedo en el que el RAP se lubrica con los fluidos (agua y emulsión) y se provee la suficiente energía de agitación para dispersarlos en todo el material. En la Fig 4.1-2, se muestra el proceso de mezclado, en el que se observan las principales actividades: mezcla de los agregados secos, adición de agua, la emulsión, mezclado en máquina (ver Fig 4.1-3) y cuarteo de la mezcla para llevar a la compactación.

4.1.2. Procedimiento de Compactación

El diseño inicial se planteó con compactación Marshall con 75 golpes por cada cara del espécimen y Compactación en Giratorio con 180 giros, 600kPa de presión y el ángulo de inclinación de 1,25°. En ambos casos las briquetas entraron al proceso de curado luego de 24 horas de fabricación. En el caso de las briquetas Marshall se extraen de los moldes luego de 24 horas de la compactación con el equipo mostrado en la Fig 4.1-5 y en el caso de las briquetas fabricadas en el compactador

giratoria se dejaron a temperatura ambiente de laboratorio (25°C) durante 24 horas previas al curado.

4.1.2.1. Compactación Marshall

Se utilizó el compactador automático de cara plana, mostrado en la [Fig 4.1-4](#)~~Fig 4.1-4~~. Las dimensiones, pesos y las características del compactador utilizado cumplen con las normas EN 12697-30 y ASTM D6926. El molde de compactación tiene un diámetro de 101,5mm para a fabricación de especímenes de diámetro y está provisto de una extensión o cuello que le sirve de guía al martillo compactador. Los moldes fueron llenados con 1150g de mezcla con el objetivo de obtener muestras con una altura constante de 63mm. Luego de compactado, el espécimen permanece dentro del molde por 24 horas y luego con un extractor como el mostrado en la Fig 4.1-5, se desmolda y se inicia el procedimiento de curado.

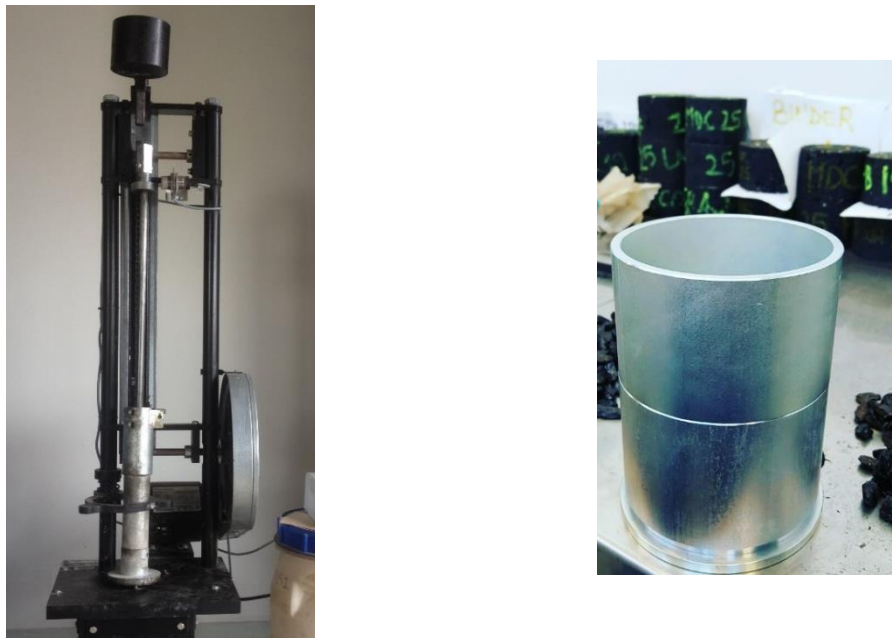


Fig 4.1-4 Compactador Marshall y molde de compactación previo a la compactación.



Fig 4.1-5 Extractor de briquetas Marshall.

4.1.2.2. Compactación Giratoria

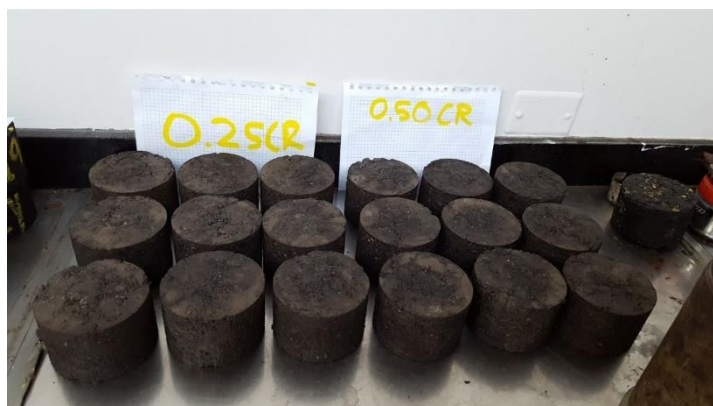
La mezcla asfáltica está contenida dentro de un molde cilíndrico limitado por platinas metálicas removibles y mantenido a una temperatura constante ($25^{\circ}\text{C}\pm 1$) durante toda la duración del ensayo. La compactación se consigue mediante la acción simultánea de una baja compresión estática y de la acción de cizallamiento resultante del movimiento del eje del molde. Se realizó en el equipo mostrado en la [Fig 4.1-6](#). Los especímenes permanecieron en reposo durante 24 y luego de estas 24h se marcaron y se metieron en el horno de curado como se observa en la Fig 4.1-7.

La compactación se realizó de acuerdo a la norma EN 12697-31:2007, con una constante presión de 600kPa y un ángulo de inclinación de $1,25^{\circ}$ a una velocidad de 30 ± 0.5 rpm y 180 de giros. Se encontró una densidad entre 91.1 y 96.4% de la densidad máxima teórica, estos resultados serán explicados en la sección 6.2.



Fig 4.1-6 Compactador giratorio y espécimen recién compactado.

a)



b)



c)



Fig 4.1-7. a). Briquetas recién compactadas en compactador giratorio, b) Briquetas a las 3 horas de compactadas y c) luego de 24 horas de fabricación.

4.1.3. Procedimiento de Curado

Algunas investigaciones han analizado la resistencia a la edad temprana (curado inicial) que se logra aproximadamente dentro de las primeras 15 horas a 77°F (25°C), ya que se intenta simular el tiempo en que la vía puede ser abierta al tráfico poco después de la construcción, sin que se presenten daños como el ahuellamiento o deformación permanente. Además del curado inicial existen dos etapas adicionales de curado, el curado intermedio, el cual se realiza por 4 días a 60°C luego de finalizado el curado inicial y el curado a largo plazo que es simulado con 30 días de almacenamiento a temperatura controlada de 60°C (Sebaaly *et al.*, 2004).

Además, con respecto al curado, se ha estudiado la relación de la temperatura y dosificación de cemento en el curado de las mezclas y se concluye que la temperatura afecta directamente la tasa

de evaporación del agua y la dosificación del cemento tuvo un impacto importante en los valores a largo plazo de la resistencia a la tracción indirecta. Los resultados sugieren que el curado debido a la pérdida de humedad tuvo un mayor impacto en la evolución de los ITS (Indirect tensile strength), mientras que la evolución de ITSM (Indirect tensile strength modulus) estaba más ligado a la hidratación del cemento (Graziani *et al.*, 2016). De acuerdo a la revisión de la literatura, la temperatura y el tiempo de curado mayormente utilizado es de 72h y 40°C, debido a que simula la evaporación total del agua de la mezcla. En esta investigación, se utilizó curado en horno de circulación forzada a 40°C, luego de este las muestras tienen un aspecto como el mostrado en la Fig 4.1-8.

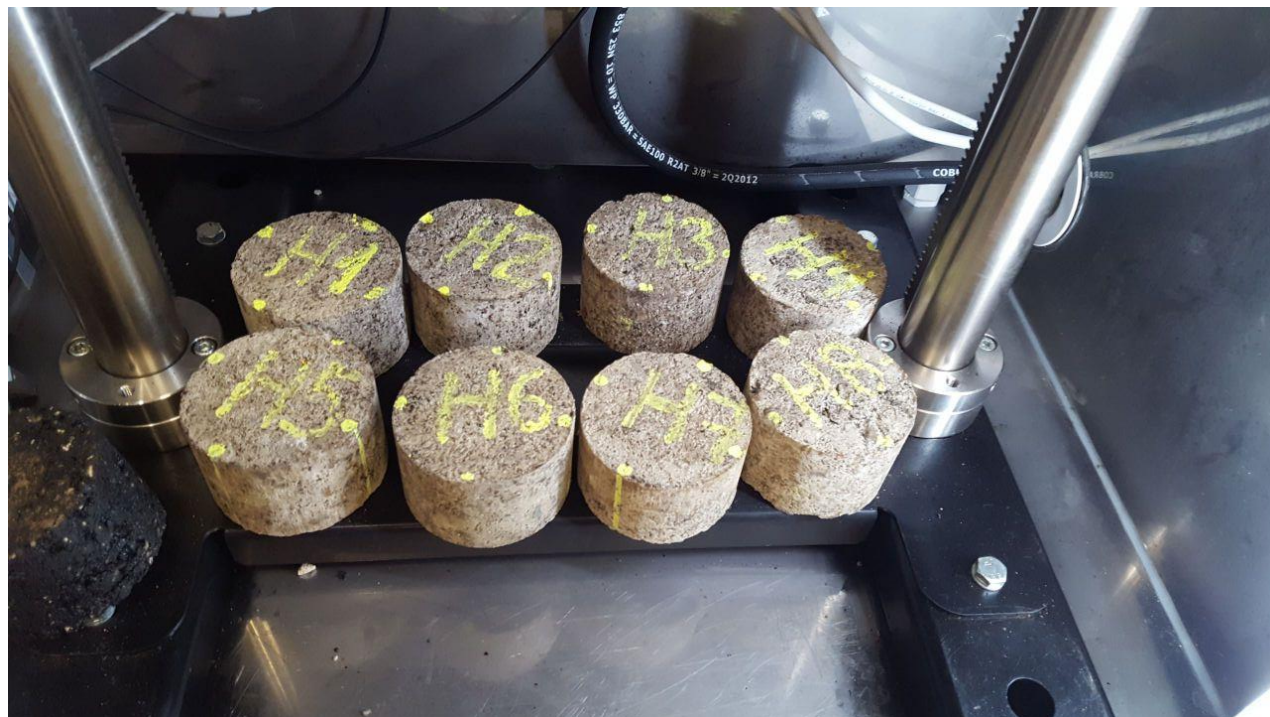


Fig 4.1-8. Briquetas en estado seco, luego del período de curado de 72h a 40°C.

4.2. Caracterización Volumétrica

La caracterización volumétrica de las muestras se realizó a través de la G_{mm} , G_{sb} y G_{sa} .

4.2.1. Gravedad específica máxima teórica a 25°C

La gravedad específica máxima teórica (G_{mm}) es la máxima densidad relativa que puede tener la mezcla cuando todos los vacíos se encuentren llenos. El ensayo fue realizado bajo la norma INVIAS E-735-2013, utilizando el equipo Rice, el cual se muestra en la Fig 4.2-1. El equipo está compuesto por un picnómetro, una bomba de vacío, un manómetro y una mesa vibratoria para facilitar la extracción de los vacíos de aire contenidos en la muestra.



Fig 4.2-1 Equipo Rice.

Teniendo en cuenta el tamaño máximo de la mezcla, se escogen 3 muestras representativas de mínimo 2500 g. Cada muestra debe estar seca al horno y previamente pesada, se introducen con agua en el picnómetro de vacío. Se agrega agua para que la muestra quede sumergida. Se aplica vacío durante 15 ± 2 min. Se retira el vacío gradualmente. Finalmente, se llena la muestra de agua hasta el nivel de enrase y se pesa en el aire, esto con el objetivo de obtener el volumen de la muestra. Con estas medidas, se calcula la gravedad específica máxima utilizando la [Ecuación 4.2-1](#)

Ecuación 4.2-1. Gravedad específica máxima.

$$G_{mm} = \frac{A}{A + (D - E)}$$

A: masa en el aire de la muestra seca, g.

D: masa de la tapa más el picnómetro lleno de agua 25°C, g.

E: masa del picnómetro con la tapa, el agua y la muestra a 25°C, g.

4.2.2. Gravedad específica bulk

El ensayo de gravedad específica bulk, se realizó bajo la norma colombiana INV E-733-13, con especímenes saturados y superficialmente secos pesados al aire.

4.2.3. Gravedad específica aparente

El ensayo de gravedad específica aparente se realizó con los especímenes secos pesados al aire y sus dimensiones, por eso es conocida como “gravedad específica geométrica”.

4.2.4. Contenido de Vacíos llenos de aire

La relación de vacíos llenos de aire es la cantidad de aire que existe dentro de la briqueta y se calcula con la gravedad específica bulk G_{mb} , con relación a la gravedad específica máxima teórica G_{mm} . Se calculó a través de la [Ecuación 4.2-2](#) ~~Ecuación 4.2-2~~. Este valor, tiene influencia en el rendimiento de las mezclas y para una mezcla en frío reciclada pueden variar entre 10 y 15% (Wirtgen GmbH, 2012).

Ecuación 4.2-2 Contenido de vacíos llenos de aire

$$Vacíos [\%] = \left[1 - \frac{G_{sbulk}}{G_{mm}} \right]$$

4.3. Ensayos De rigidez

Para llevar a cabo las pruebas dinámicas se utilizó el equipo DYNAPAVE mostrado en la Fig 4.3-1. Este equipo es capaz de medir el esfuerzo a través de una celda de carga y con sensores colocados en el interior de una cámara termostática en la que es posible controlar la temperatura desde -20°C a 60°C . La versatilidad de la máquina ha permitido realizar diferentes tipos de pruebas cambiando la configuración de algunos accesorios.

La investigación ha dado como resultado datos útiles para hacer una comparación del efecto de la proporción de los residuos con la rigidez, la resistencia a la deformación permanente, la resistencia a la tracción indirecta y al análisis de la susceptibilidad al agua.

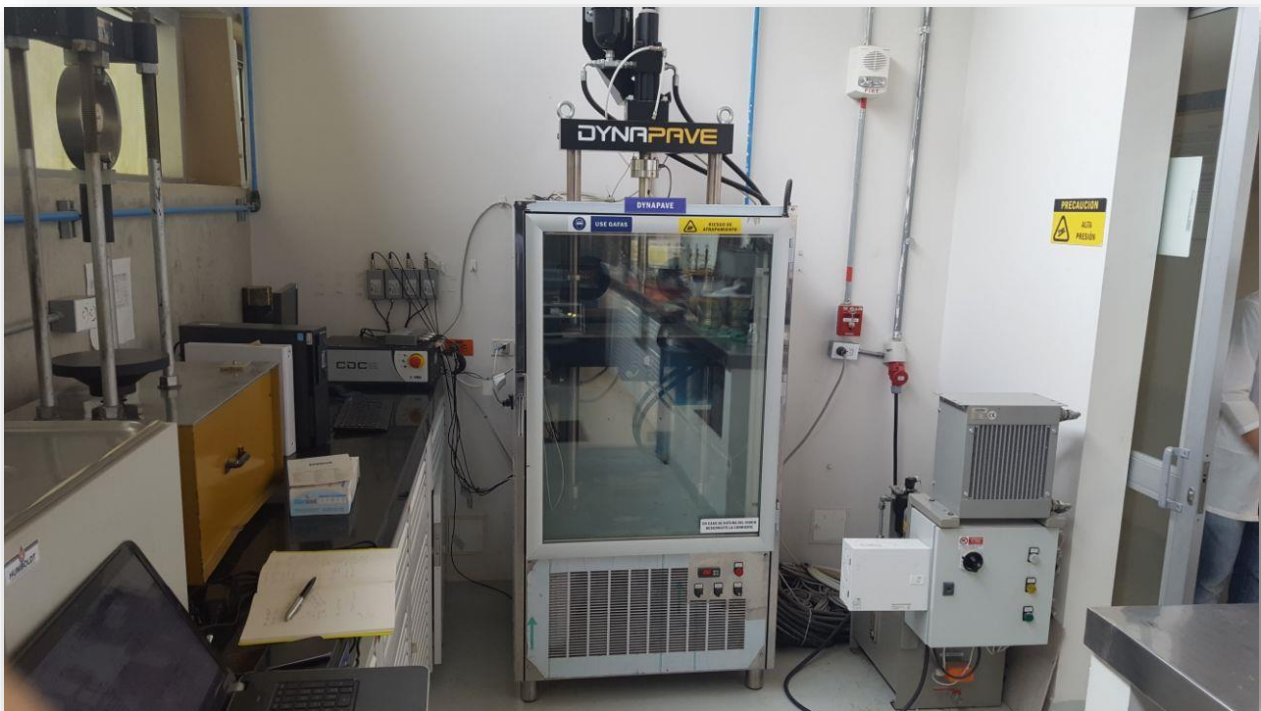


Fig 4.3-1. Máquina de ensayos dinámicos

4.3.1. Módulo de Rigidez en máquina de ensayos

El ensayo de módulo de Rigidez, parámetro fundamental en el diseño de pavimentos, es la relación entre el esfuerzo y la deformación de un material viscoelástico lineal sometido a una carga de tipo sinusoidal. Este ensayo está normalizado en la ASTM D7369-11 y la EN 12697-26:2012. En la presente investigación, se utilizó el método descrito en el Anexo C, de la norma europea EN: 12697: 2012. Este describe una metodología para medir la rigidez elástica de las mezclas

bituminosas utilizando un método de tracción indirecta como se muestra en la Fig 4.3-2. Este método es aplicable a muestras cilíndricas de varios diámetros y grosores, fabricado en el laboratorio o a núcleos extraídos de una capa de pavimento. El objetivo de este ensayo es reproducir condiciones de servicio, ambientales y de tráfico, a través de la temperatura y frecuencia de carga.

La carga es aplicada mediante dos franjas de acero inoxidable, de acuerdo a la Fig 4.3-2 en los puntos ubicados con los números 4 y 8. La cara en contacto con el espécimen será cóncava y se extenderá sobre el ancho completo de la muestra (número 4).

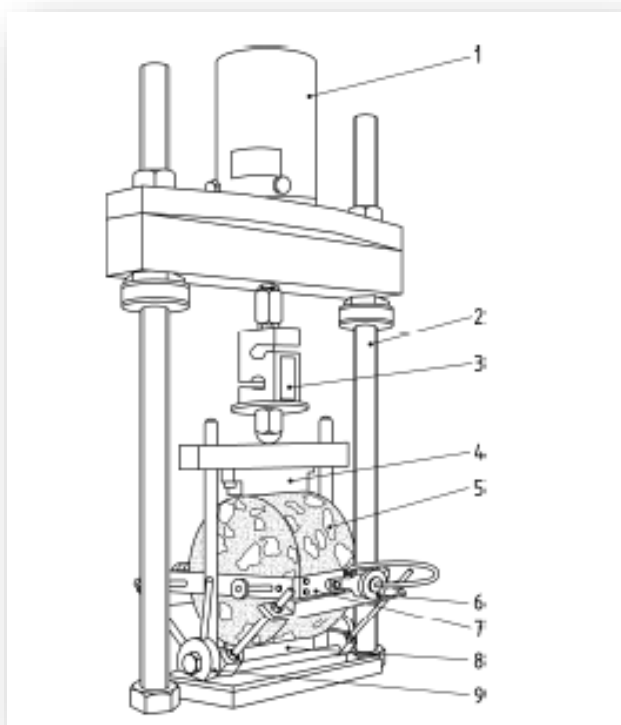


Fig 4.3-2. Montaje Ensayo de Módulo a tracción indirecta.
Fuente: norma EN 12697-26:2012 Anexo C.

Las partes principales del montaje con respecto a la Fig 4.3-2 son:

- 1 actuador de carga neumática
- 2 marco de carga de acero
- 3 celda de carga
- 4 franja carga superior
- 5 espécimen de prueba
- 6 ajustador de deformímetros
- 7 marco de montaje de deformímetros
- 8 franja inferior de carga

9 plantilla de alineación LVDT

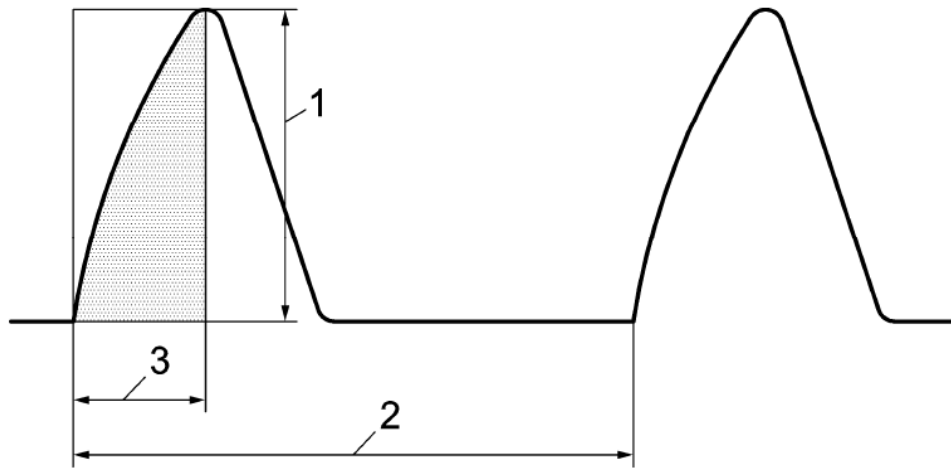


Fig 4.3-3. Carga en forma de onda haversiana en ensayo de módulo a tracción indirecta. Fuente: norma EN 12697-26:2012.

Para el desarrollo de la prueba, la carga es aplicada por el actuado a lo largo del diámetro vertical de las muestras, a través de las franjas de carga. La carga es aplicada en forma de onda haversiana (ver Fig 4.3-3). Este actuador de carga debe ser capaz de aplicar impulsos de carga repetidos con el período de descanso. La velocidad de aplicación de la carga es controlada a través del tiempo de carga. Para esto, se define el parámetro tiempo pico o RISE TIME (número 3 en la figura 8-3), el cual es el tiempo, en el que la carga aplicada incrementa desde la carga inicial de contacto a la máxima.

Los bordes de las franjas de carga deben ser redondeados para evitar cortar la muestra durante la prueba. La franja superior deberá hacer contacto con el sistema de carga a través de asientos esféricos. En la Fig 4.3-4 se puede observar el montaje de una probeta en laboratorio en el equipo. El actuador se ubica en el eje vertical cuya base es esférica, reposa sobre la franja de carga superior y encajan perfectamente. La muestra es colocada entre estas dos franjas. A los lados del espécimen, se encuentran los deformímetros los cuales registran la deformación radial en el eje opuesto al de la carga.

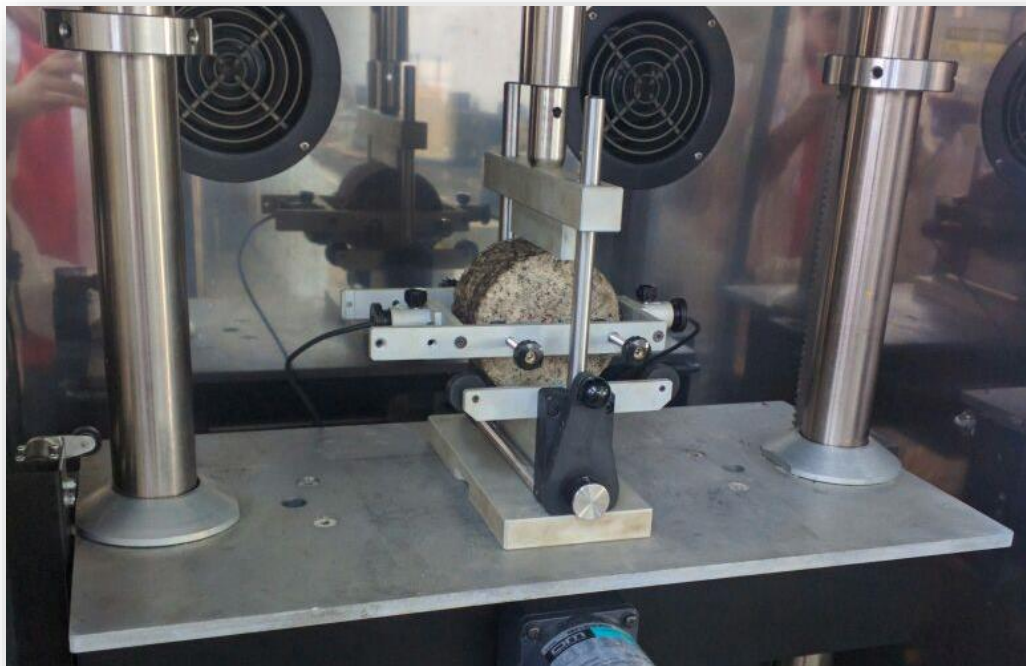


Fig 4.3-4. Montaje en laboratorio de probeta para medición de Módulo a tracción indirecta en máquina de ensayos.

El ensayo consta de una fase de acondicionamiento en la que se realizan 7 pulsos en el que no se registran los datos y finalmente la prueba es realizada en 5 pulsos, como se observa en la Fig 4.3-5. En algunas ocasiones las briquetas fueron ensayadas a lo largo de los dos diámetros.

Con el objeto de caracterizar la mezcla se realizó esta prueba bajo las siguientes condiciones:

- Temperatura: 5, 25 and 40 ° C.
- Frecuencia de carga: 0.5, 1, 2 y 4 Hz.

Para minimizar el daño potencial a las muestras, las pruebas comenzaron a la temperatura más baja y pasaron a una temperatura más alta. Para una temperatura dada, las pruebas comenzaron con la mayor frecuencia de carga y procedieron a una frecuencia más baja. Los especímenes se acondicionan a la temperatura de ensayo por un tiempo de 2 horas se utiliza una muestra “tonta” en el que se introduce un termómetro para verificar la temperatura del exterior y del núcleo, con el objeto de que la temperatura haya penetrado hasta el interior. En la Fig 4.3-5 se aprecia una imagen del software Dynapave, en la que se aprecia en la parte superior los parámetros de la prueba y debajo la imagen de los 5 pulsos y sus respectivos resultados graficados para el actuador y los deformímetros laterales.



Fig 4.3-5. Imagen del software Dynapave para el ensayo de Módulo a tracción indirecta a 5°C y 0.5Hz (495ms de RISE TIME) según la norma EN 12697-26:2012.

4.3.1.1. Curvas Maestras

Las mezclas asfálticas son caracterizadas por su módulo de elasticidad, el cual es función de la temperatura y la frecuencia de carga, debido a que es un material viscoelástico. Por eso es conocido como Módulo De rigidez. El ligante asfáltico en la mezcla es el responsable de la respuesta dinámica de la mezcla, debido a que tiene un comportamiento reológico que cambia con la temperatura y la velocidad de aplicación de la carga. Adicionalmente, el estudio del comportamiento del asfalto, ha encontrado que bajo un nivel de carga constante la variación del módulo de rigidez con la temperatura bajo una frecuencia fija puede ser similar a la variación del mismo, cuando se mantiene la temperatura fija y se varía la frecuencia. Esto significa que es válida la aplicación del principio de superposición parcial para obtener en un espectro de frecuencias a una temperatura de referencia el módulo de rigidez a partir de un número limitado de datos experimentales (Di Benedetto, y otros, 2011).

En el caso de mezclas recicladas, tanto el ligante envejecido como el ligante nuevo añadido determinan el comportamiento de la mezcla (Cardone, Grilli, Bocci, & Graziani, 2015). La rigidez de las mezclas en frío, se ve afectada además por el curado. Los resultados indican que cuando el curado ha finalizado, es decir ya se alcanzaba el tiempo total de curado (aprox. 30 días), la rigidez llega a un punto de estabilización, lo cual se relaciona con la disminución de la humedad de la mezcla (Grilli, Bocci, & Graziani, 2013).

Con los resultados del módulo de tracción indirecta, se analizaron los modelos de curvas para cada tipo de mezcla, a través de un Modelo Sigmoidal (~~Ecuación 4.3-1~~~~Ecuación 4.3-1~~, ~~Ecuación 4.3-2~~~~Ecuación 4.3-2~~ y ~~Ecuación 4.3-3~~~~Ecuación 4.3-3~~). Se utilizó la ecuación de Arrhenius para determinar el facto de desplazamiento ya que se encontró que ofrece el mejor ajuste para ecuaciones no lineales (Pellinen, Witczak and Bonaquist, 2004).

Ecuación 4.3-1

$$\text{Log}|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma * \text{Log} f_r}}$$

Ecuación 4.3-2

$$\text{Log } f_r = \log_f + \log_{at}$$

Ecuación 4.3-3

$$at = \frac{\Delta E_a}{2.303R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right)$$

Dónde:

$|E^*|$ = módulo dinámico de la mezcla

$\alpha = (\log(E^*_{max}) - \log(E^*_{min}))$

$\delta = \log(E^*_{min})$

f_r = frecuencia de referencia

β, γ = parámetros de ajuste del modelo sigmoidal

at = factor de desplazamiento.

T = temperatura de ensayo.

T_r = temperatra de referencia.

4.3.2. Resistencia a la deformación permanente: Creep

Durante la vida útil de un pavimento asfáltico, se generan deformaciones, que por el carácter viscoelástico del material algunas no son recuperables. En las condiciones viscosas, cuando se supera el rango elástico del material, las deformaciones no son completamente recuperables y se acumulan en cada ciclo hasta que alcanza el punto de rotura. Las deformaciones permanentes en un pavimento se conocen con el término ahuellamiento. Visualmente se caracteriza por surcos en forma de las huellas “u” con una pendiente que dejan los neumáticos al pasar por el pavimento.

La resistencia a la deformación permanente ha sido evaluada en mezclas asfálticas a través del análisis de la deformación por carga repetida. Este método está normalizado en la EN 12697-25 Método A-Uniaxial. El espécimen de prueba cilíndrico, se acondiciona a la temperatura de ensayo la cual debe ser elevada, en este caso se utilizó la que referencia la norma 40 grados Celsius y es colocado entre dos placas paralelas de carga, como se observa en la Fig 4.3-6. El espécimen se somete a una presión de impulso axial cíclica, cuando se trata de ensayos uniaxiales, es decir no se aplica presión adicional de confinamiento lateral. Durante el ensayo, el cambio de altura de la muestra se mide con un número determinado de aplicaciones de carga. A partir de la deformación axial acumulativa ϵ_N (deformación permanente) de la muestra de ensayo se determina como una función del número de aplicaciones de carga.



Fig 4.3-6. Especimen ubicado entre placas paralelas para configuración del ensayo de deformación permanente.

Los resultados del ensayo, se expresan en una gráfica de Deformación permanente vs número de aplicaciones de carga. Como la que se observa en la Fig 4.3-7, el ensayo de Creep tiene las siguientes 3 fases principales:

Fase 1: fase inicial en dónde la pendiente de la curva disminuye con el incremento de los ciclos de carga.

Fase 2: la pendiente casi no presenta variación y luego se presenta un punto de inflexión en la curva de deformación.

Fase 3: última parte, cuando la deformación incrementa con el incremento de los ciclos de carga. También conocida como “fluencia”.

Dependiendo de la característica de la mezcla y de la prueba una o dos de las fases pueden no existir.

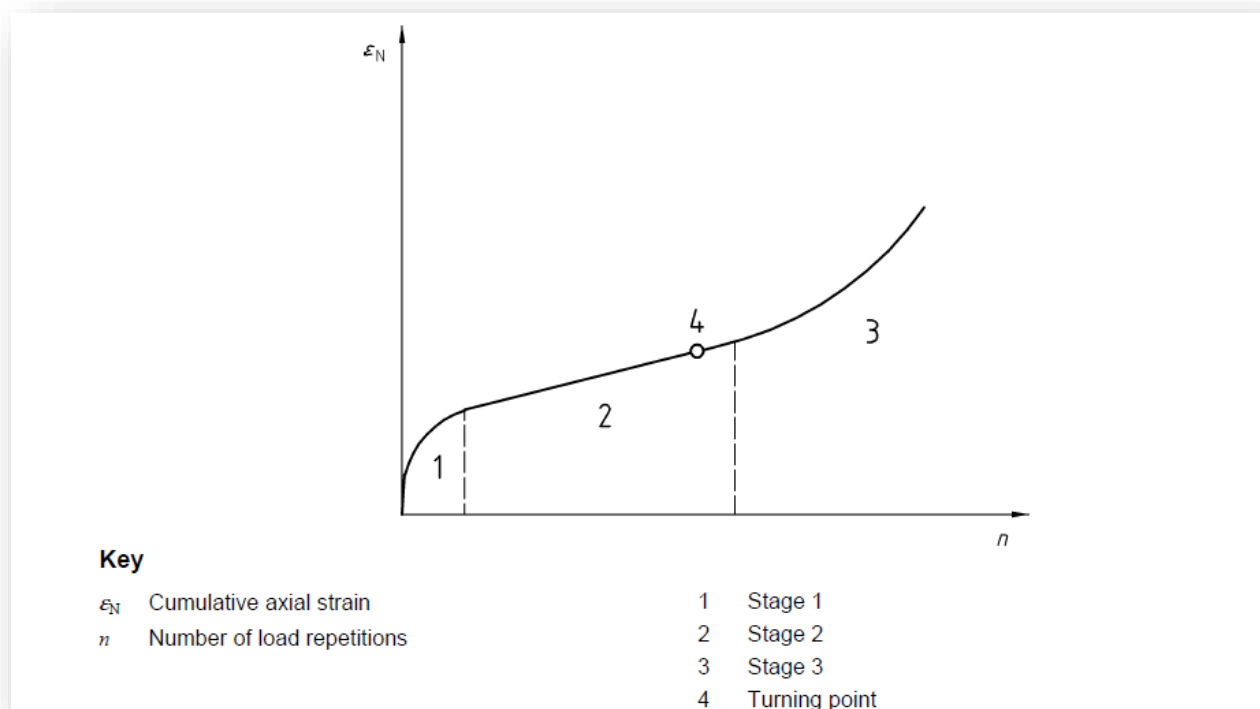


Fig 4.3-7. Esquema representativo de curva de Creep. Fuente: EN 12697-25.

Las pruebas se realizaron con muestras cilíndricas, compactados por medio de compactación Dinámica (Compactador Marshall) y por Amasado (Giratorio), estas se acondicionan por un tiempo de 2 horas mínimo a la temperatura de ensayo, teniendo en cuenta que a temperatura del espécimen “tonto” sea aproximadamente igual en el núcleo y en la superficie. La muestra se coloca en la máquina de ensayos de rigidez de rigidez s, con una carga de acondicionamiento de 10 kPa durante 600 s (10 minutos). Luego, se elimina la carga de acondicionamiento y se aplica una carga

de 100 kPa durante 3600 ciclos con carga de 1 segundo y 1 segundo de descanso, como se observa en la Fig 4.3-8. Durante la prueba de Creep, la deformación axial se midió mediante dos deformímetros verticales colocados sobre la plataforma metálica que se ubica encima de la briqueta.

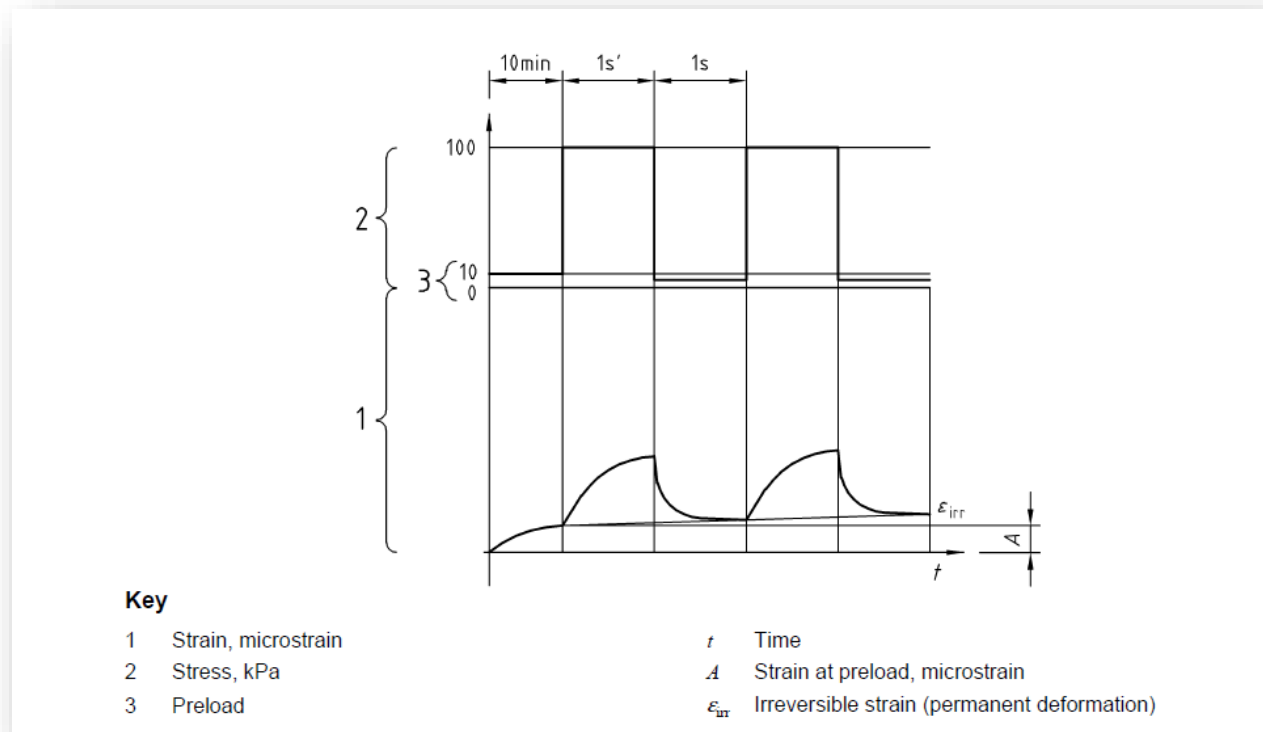


Fig 4.3-8. Curva esfuerzo-deformación en la prueba de Creep Dinámico.

Los parámetros bajo los que se realizaron todos los ensayos se encuentran en la [Tabla 4.3-1](#) ~~Tabla 4.3-1~~, bajo los cuales se programa la prueba en el software y se obtiene una gráfica como el mostrado en la [Fig 4.3-9](#) ~~Fig 4.3-9~~.

Tabla 4.3-1. Parámetros prueba de Creep.

Parámetros de la prueba	Valores
Temperatura	40°C
Esfuerzo axial de acondicionamiento	10kPa
Tiempo de acondicionamiento	10 min
Esfuerzo cíclico aplicado	100kPa
Ancho del pulso de carga	1000ms
Tiempo de rampa	600s
Número de pulsos	3600 (2 h)

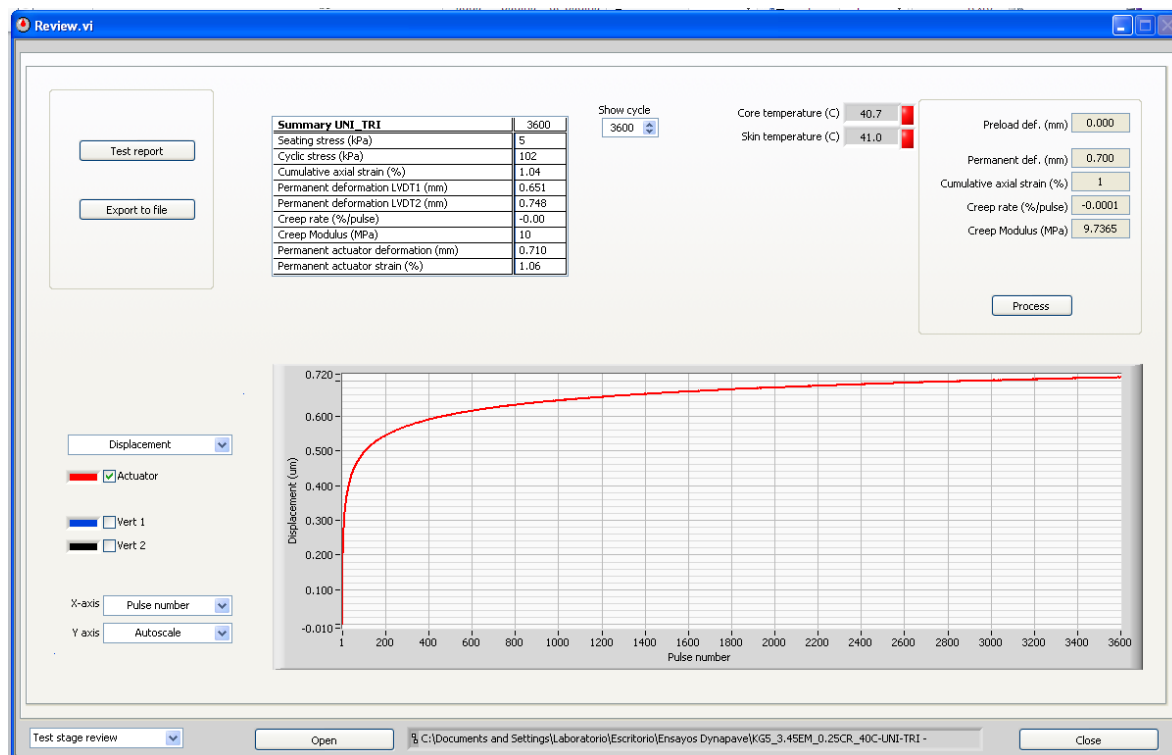


Fig 4.3-9. Imagen del software Dynapave para el Ensayo de Creep en la máquina según la norma EN 12697-25 Método A.

4.4. Resistencia a la tracción indirecta y Susceptibilidad a la humedad

En laboratorio, la prueba de resistencia a la tracción indirecta se ha utilizado para evaluar la resistencia de las mezclas de frío recicladas (Lee, Brayton, & Huston, 2002; Lee, Brayton, & Harrington, 2003; Graziani, Godenzoni, Cardone, & Bocci, 2016). En esta prueba, las muestras cilíndricas fallan al aplicar cargas de compresión a lo largo de un plano diametral a través de dos franjas de carga opuestas.

El ensayo se realiza a una temperatura específica, usualmente 25°C y se puede realizar en briquetas acondicionadas bajo la inmersión en agua o en briquetas acondicionadas en seco. En la presente tesis, se realizó en briquetas de la misma mezcla (6 especímenes mínimo) a los que se subdividió en 2 grupos aleatoriamente, los que se ensayaron en seco y los que se ensayaron luego de la saturación parcial.

Para el acondicionamiento de los especímenes, todos, una vez se finaliza el período de curado (40°C por un tiempo de 72h), dependiendo del tipo de acondicionamiento se realiza lo siguiente:

- Seco: se acondicionan a 25°C dentro de una cámara ambiental por mínimo 24h.

- Húmedo: se llevan a saturación parcial aplicando vacío a una presión de -20 pulgadas de mercurio por un tiempo de 5 minutos.

4.4.1. Ensayo de Resistencia a la tracción indirecta

La resistencia a la tracción indirecta se midió bajo la norma colombiana INV E-725-13. Esta prueba consiste en la aplicación de una carga en las briquetas en el eje diametral, a una velocidad de 50.0 ± 5 mm / min hasta que el espécimen falla. El ensayo se realiza a una temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. La resistencia se denota como la carga máxima P en KN, con aproximación de 0.1KN.

El equipo mostrado en la Fig 4.4-1 y Fig 4.4-2 en dónde se realiza el ensayo consta de las siguientes partes principales:



Fig 4.4-1. Briqueta en ensayo de resistencia a la tracción indirecta a 25°C .



Fig 4.4-2. Máquina universal de ensayos.

- Una celda de carga, capaz de mantener la misma tasa de deformación y de medir la carga con la misma o mayor precisión.
- Dos franjas de carga, de superficie cóncava y que cubran la totalidad de la altura del espécimen (ver).

A través de la siguiente ecuación, se calcula la resistencia a la tracción indirecta ITS(Wirtgen Group, 2012):

$$ITS = \frac{2 * P}{\pi * h * d} * 1000000$$

ITS = resistencia a la tracción indirecta [KPa]

P = máxima carga aplicada [KN]

h = espesor promedio del espécimen [mm]

d = diámetro promedio [mm]

4.4.2. Susceptibilidad al daño por humedad

La susceptibilidad a la humedad de una mezcla asfáltica está muy relacionada con las fuerzas de cohesión y adhesión. La primera, la propia fuerza debida a la capacidad de unir las partículas propia del asfalto y la segunda, que es la fuerza que se genera debida a la interacción entre el asfalto y el agregado (Cheng, Little, Lytton, & Holste, 2002).

Existen variadas pruebas que se realizan para medir el daño por humedad generado en una mezcla asfáltica, el objeto de estos, es simular el efecto que tiene el agua en la mezcla y obtener cuantitativamente qué tanta adherencia se pierde, en Colombia se pueden usar los siguientes:

- Ensayo de inmersión compresión (INV E 738-13).
- Ensayo de tracción indirecta (INV E 725-13).

El cociente entre la resistencia a la tracción indirecta en condición húmeda y en condición seca, se define como la resistencia retenida, mostrado en la Ecuación 4.4-1. La cual fue calculada como el promedio de 3 especímenes por cada condición de ensayo.

Ecuación 4.4-1. Resistencia retenida en ensayo de tracción indirecta.

$$TSR[\%] = \frac{ITS_{húmeda}}{ITS_{seca}}$$

5. Diseño de mezcla y descripción de los ensayos

Este capítulo detalla todo el proceso de diseño de mezcla, caracterización de materiales, así como se describen los procedimientos utilizados en laboratorio para los ensayos realizados a las muestras fabricadas para analizar su desempeño dinámicas, mecánicos y de caracterización volumétrica de las mezclas.

5.1. Mezcla de Diseño

Para el Diseño de la mezcla reciclada en frío, se tomaron como referencia la especificación de las normas INVIAS CAPÍTULO 4 ART. 461 y el Manual de Reciclaje en frío de Wirtgen 2004 y 2012. Teniendo en cuenta la revisión de la literatura también se definió las variables más importantes que afectan el diseño y se realizó una adaptación al laboratorio. Las principales partes del diseño de mezcla son las siguientes:

5.1.1. Ajuste de la granulometría de la mezcla

De acuerdo a la granulometría de los agregados, se ajustó la proporción de RAP por fracción de tamaño (0-4,75mm, 4,75-12,7mm y 12,7mm-19mm), como se muestra en la [Tabla 5.1-1](#)~~Tabla 5.1-4~~. Se adicionó 5% de carbonato de calcio para incrementar el contenido del porcentaje que pasa el tamiz 200 y cumplir con los límites establecidos para las dos referencias utilizadas. La granulometría final de la mezcla identificada como RAP<19mm se encuentra en la [Tabla 5.1-2](#)~~Tabla 5.1-2~~.

Tabla 5.1-1 Proporciones de los agregados en la mezcla.

Materiales	
RAP 12,7-19	29,00%
RAP 4,75-12,7	12,00%
RAP 0-4,75	54,00%
FILLER (Ca CO ₃)	5,00%
Cemento	1,00%

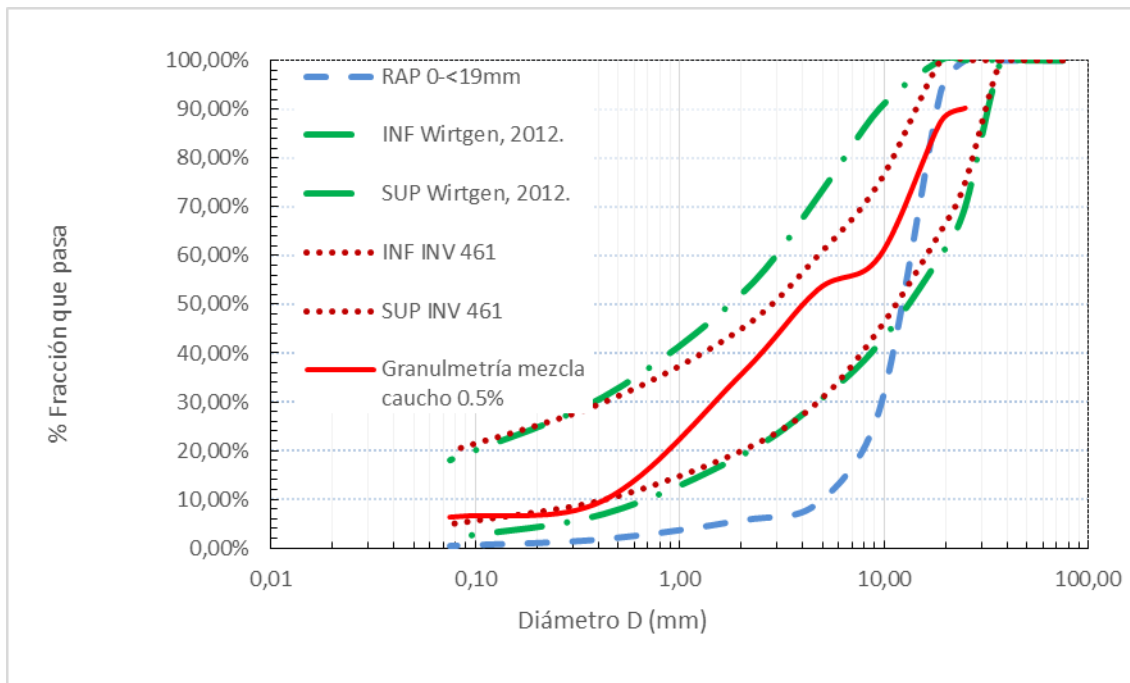
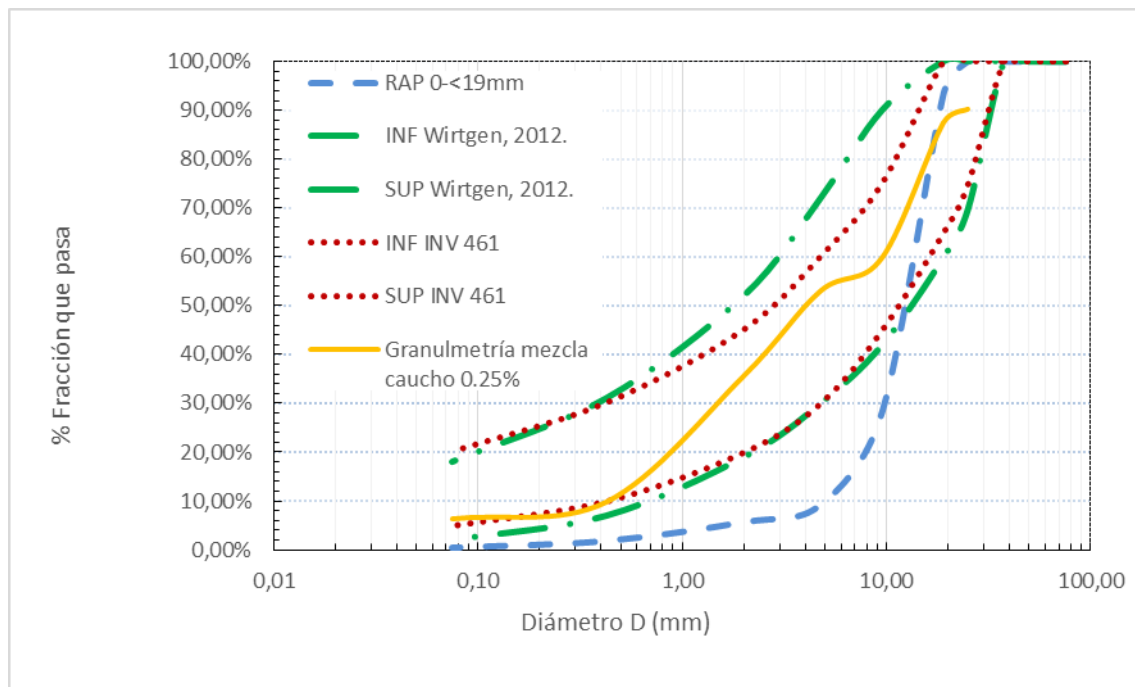
Tabla 5.1-2. Granulometría ART. 461 CAPÍTULO 4 ESPECIFICACIONES GENERALES DE INVIAS vs Granulometría recomendada por el manual de reciclaje en frío Wirtgen 2012.

Abertura del tamiz (mm)	Abertura del tamiz (ASTM)	ART. 461		Wirtgen		Mezcla 0
		INF	SUP	INF	SUP	RAP <19mm
75	3"	100%	100%	100%	100%	100,00%
50	2"	100%	100%	87%	100%	100,00%
37,50	1 1/2"	100%	100%	76%	100%	100,00%
25	1"	75%	100%	70%	100%	95,00%
19	3/4"	65%	100%	60%	100%	92,24%
9,50	3/8"	45%	75%	42%	90%	63,70%
4,75	No. 4	30%	60%	30%	72%	54,92%
2	No. 10	20%	45%	19%	52%	36,88%
0,425	No. 40	10%	30%	7%	31%	10,17%
0,075	No. 200	5%	20%	2%	18%	6,42%

A partir de la mezcla control RAP <19mm, se realizó un reemplazo de una fracción fina, la que se compone de agregado menor a 4,75mm con caucho y calamina (ver

Fig 5.1-1

~~Fig 5.1-1~~ y ~~Fig 5.1-2~~ Fig 5.1-2 se encuentran las granulometrías definidas para cada tipo de mezcla con caucho y calamina en función del porcentaje de reemplazo del RAP por el material añadido.



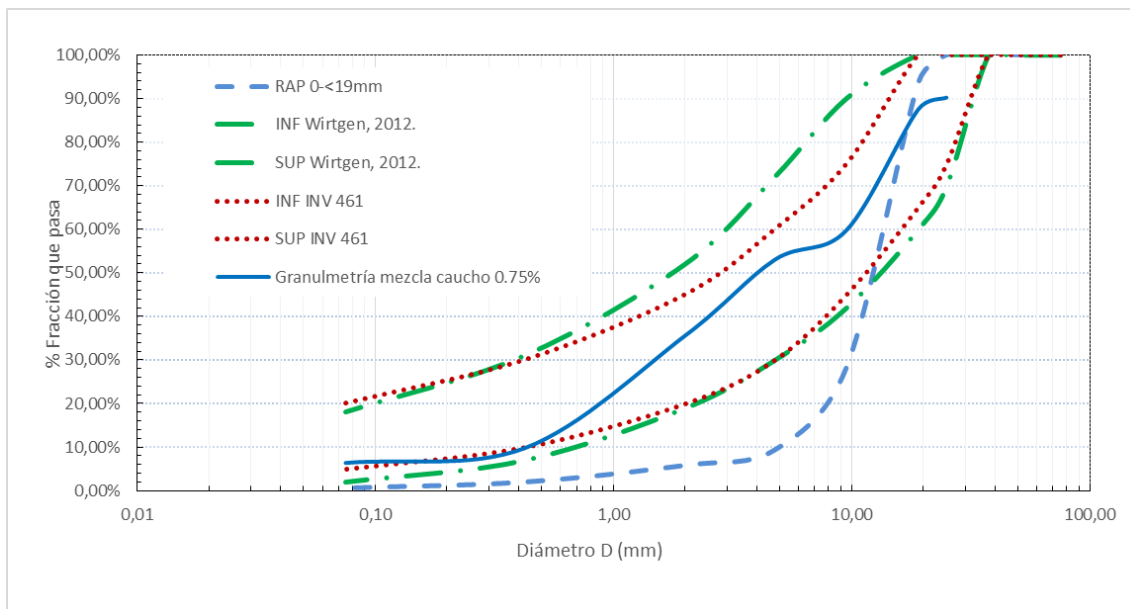


Fig 5.1-1. Granulometrías de las mezclas con 0,25%, 0,5% y 0,75% de caucho.

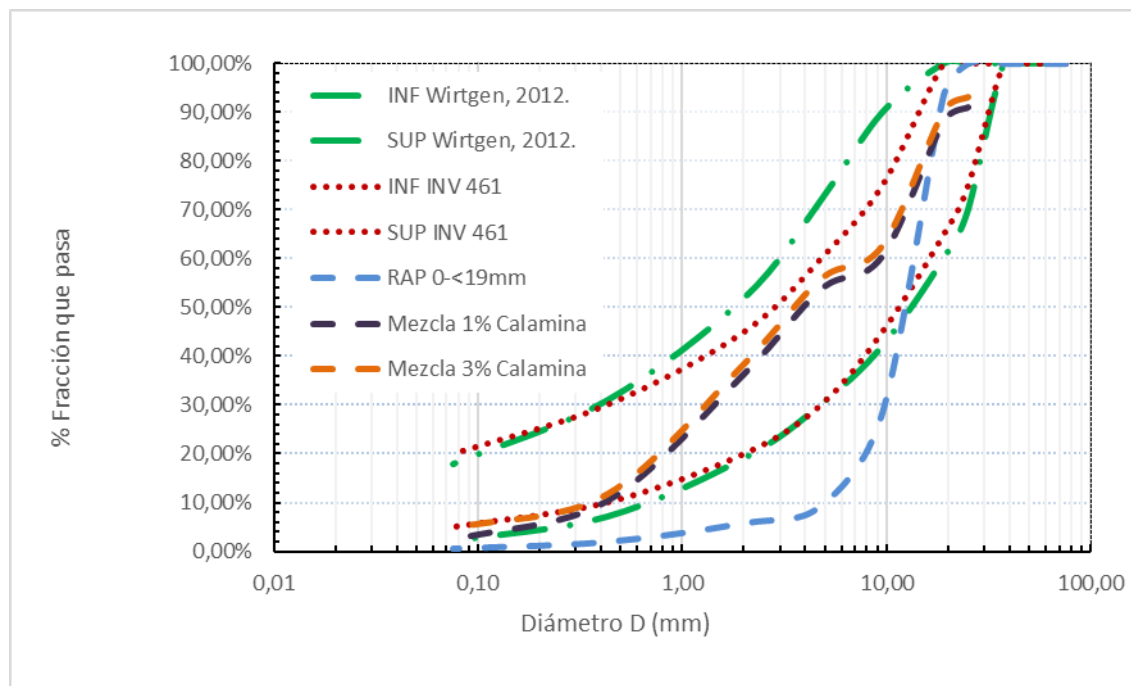


Fig 5.1-2. Granulometría de las mezclas con Calamina.

5.1.2. Demanda teórica de asfalto residual

Los resultados de investigaciones recientes, indican que el agregado reciclado, no debe considerarse como una “black rock”, porque la presencia del asfalto envejecido mejora el rendimiento de la mezcla. Este ha sido medido a través de ensayos de estabilidad Marshall, resistencia a la tracción indirecta, módulo de rigidez y fatiga, debido a que todas estas propiedades son asociadas al envejecimiento del asfalto en la mezcla (Yan, Zhu, Zhang, Gao, & Charmot, 2014). Además que se destaca que los agregados no tienen la misma capacidad de absorber asfalto debido a que poseen una capa de asfalto que los cubre en comparación con el agregado virgen (Arimilli & Nagabhushana, 2015).

Con base en la granulometría de la mezcla, es decir la superficie específica de los agregados, utilizando la ecuación 2-2 la demanda de emulsión asfáltica es de 2% teniendo en cuenta que la emulsión es 62,1% asfalto, como se observa en la [Tabla 5.1-3](#) ~~Tabla 5.1-3~~.

Tabla 5.1-3 Demanda teórica de asfalto.

Pb [%]	6,9
Pnb [%]	1,2
Emulsión [%]	2

5.1.3. Contenido óptimo de agua

Se optimizó el contenido de agua a través del ensayo de compactación modificado (AASTHO T-180 / INV E -142-13) alrededor de 6.5% que es el contenido que se presumía ser el óptimo. Los contenidos que fueron puestos a prueba fueron 2, 4, 6, 2, 12 y 14%. Los resultados se muestran en la [Fig 5.1-3](#) ~~Fig 5.1-3~~. Se obtuvo un valor de 6.9%, obteniendo una densidad máxima de 1954.9 kg/cm³.

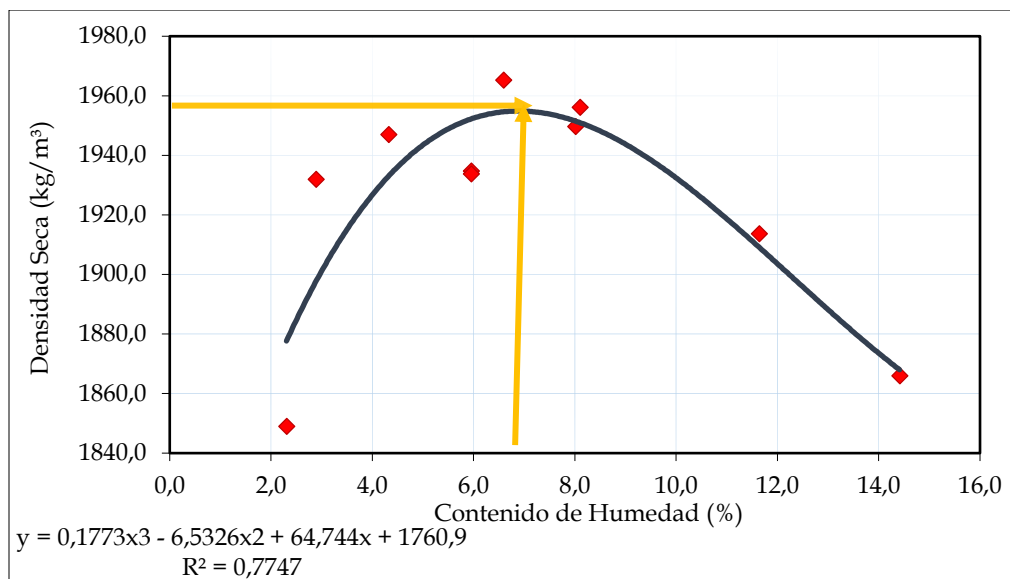


Fig 5.1-3 Humedad óptima en ensayo de compactación modificado.

5.1.4. Contenido óptimo de emulsión

Para establecer el contenido de emulsión a utilizar, se realizó una optimización con un contenido de agua constante (óptimo=6,9%) y se incrementó el contenido de emulsión. Las dosificaciones de asfalto residual se tomaron en el rango recomendado por Wirtgen GmbH, 2012 entre 1.5% a 3%, es decir entre 2.4 y 4.8% de emulsión. Los contenidos utilizados fueron: 2.4%, 3.2%, 4.0% y 4.8% (ver Fig 5.1-5).

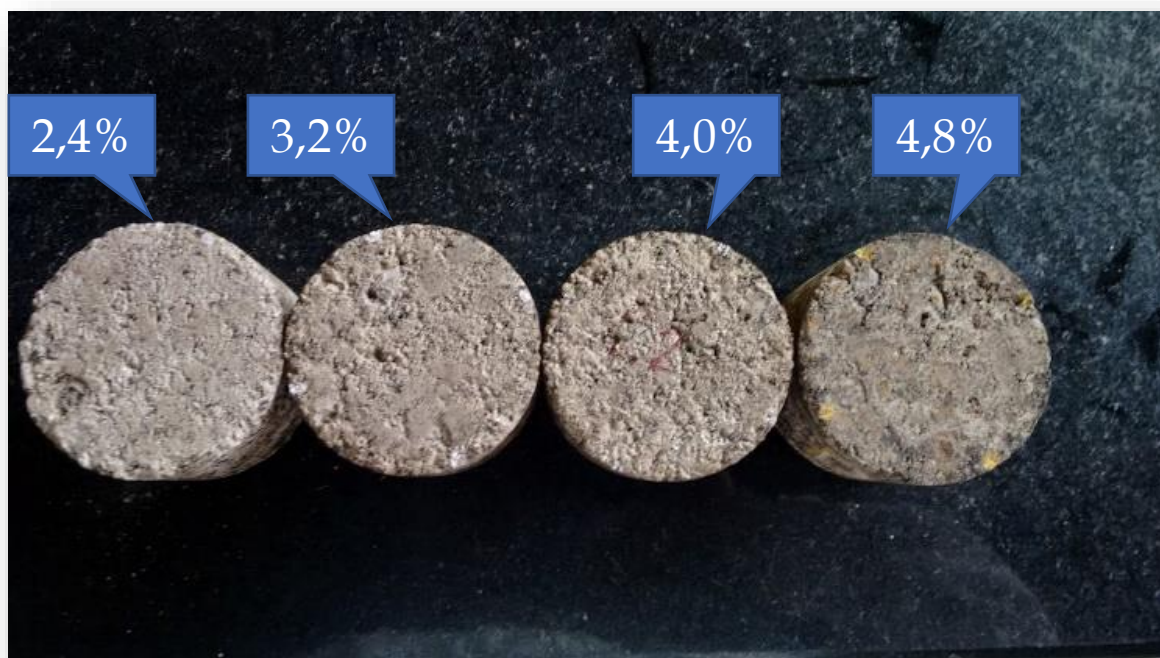


Fig 5.1-5. Briquetas con distintas dosificaciones de emulsión asfáltica.



Fig 5.1-4. A la izquierda una muestra con solo emulsión y a la derecha una briqueta con solo cemento como ligante.

Se fabricaron 6 tipos de mezcla, 4 con distintas dosificaciones de emulsión adicionadas con 1% de cemento (Fig 5.1-5) y 2 mezclas que se utilizaron para comprobar la influencia del cemento en las mezclas: 3,2% de emulsión sin cemento y 0% de emulsión con cemento (1%), mostradas en la Fig 5.1-4). Con esto se pudo establecer el contenido de emulsión mínimo con el que se obtiene una resistencia a la tracción indirecta húmeda y seca superior a 225kPa.

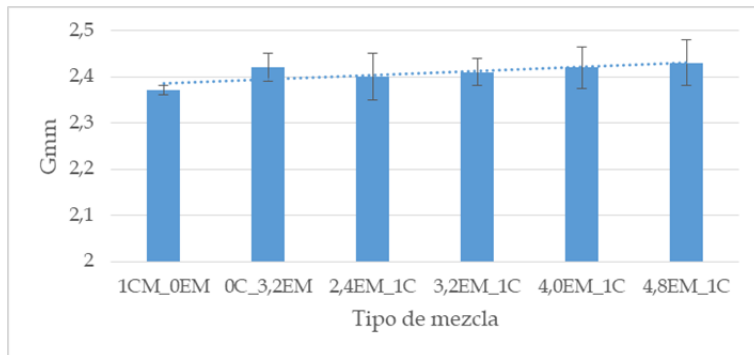
5.1.5. Resultados de la Optimización del contenido de la emulsión

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos utilizados para la optimización de la emulsión. Entre ellos se encuentran las características volumétricas de la mezcla: gravedad específica máxima (Gmm), gravedad específica bulk (Gmb), gravedad específica aparente (Gsa) y porcentaje de vacíos, módulo de rigidez y resistencia retenida medida a través del método de resistencia a la tracción indirecta.

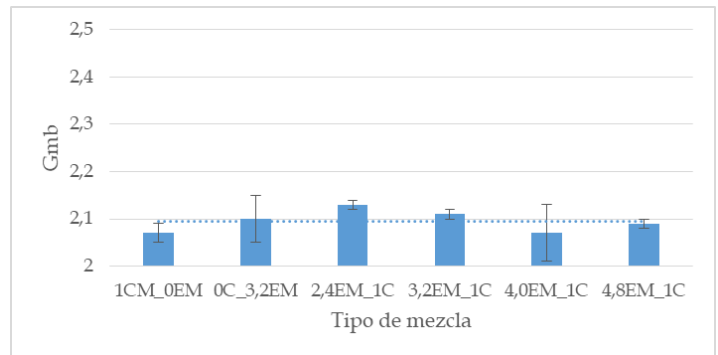
5.1.5.1. Características Volumétricas

En la Fig 5.1-6 se presentan los resultados de la caracterización volumétrica de los especímenes con distintos porcentajes de emulsión. La Fig 5.1-6 a) muestra la Gmm, la cual aumenta a medida que incrementa el contenido de emulsión, esto se atribuye a que un incremento en la dosificación de la emulsión produce un incremento de la densidad. Con base en los resultados de la Fig 5.1-6

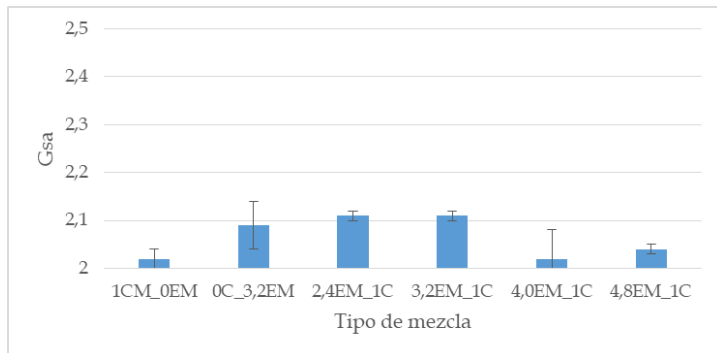
se puede observar que la mezcla con solo emulsión como ligante (0C_3,2EM) tiene una gravedad específica máxima mayor en comparación con la mezcla con sólo cemento como ligante 1C_0EM. Esto puede atribuirse a que la emulsión asfáltica llena más volumen de vacíos que el cemento, obteniéndose un volumen de vacíos menor y una densidad mayor. La Fig 5.1-6 b) muestra la G_{mb} , la cual aumenta al adicionar cemento a la mezcla debido a que el cemento tiene un efecto de densificación y de unión de las partículas. La Fig 5.1-6 c) muestra la gravedad específica aparente G_{sa} , la cual es levemente menor a G_{mb} pero tiene la misma tendencia. El porcentaje de vacíos, mostrado en la Fig 5.1-6 d) se mantiene en promedio 13% y estadísticamente no hay diferencias significativas entre las mezclas.



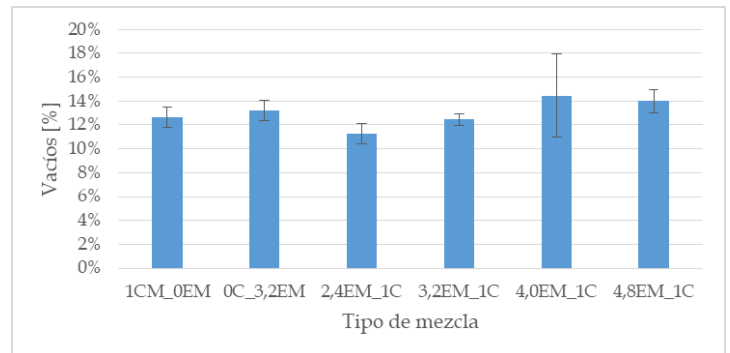
a) Gravedad específica máxima.



b) Gravedad específica bulk.



c) Gravedad específica aparente.



d) Porcentaje de vacíos.

Fig 5.1-6. Resultados de caracterización volumétrica en la optimización del contenido de emulsión

5.1.5.2. Módulo de rigidez

En la [Tabla 5.1-4](#) se presentan los resultados de los módulos de rigidez medido a tres temperaturas y 4 frecuencias de aplicación de carga, medidos sobre las mezclas con emulsión y cemento utilizadas en la optimización del contenido de emulsión, es decir 2.4%, 3.2%, 4.0% y 4.8%. En los resultados de módulo de rigidez por la tendencia de colores plasmada en la [Tabla 5.1-4](#) se puede observar que el grupo de valores a la izquierda presentan valores de módulos más altos porque la temperatura más baja se presenta a la izquierda (5°C) luego 25 y finalmente 40°C, en el que se presentan los valores más bajos y por lo tanto las tonalidades de colores más claras en la tabla. En cada subgrupo de temperaturas, los valores a la derecha de los son mayores debido a que la frecuencia también incrementa de izquierda a derecha. El mayor módulo se encuentra en baja temperatura (5°C) y alta frecuencia (4Hz) y mayor contenido de emulsión (4%). Este comportamiento es acorde con lo planteado para mezclas recicladas en frío con emulsión asfáltica debido a que los módulos al igual que en mezclas en caliente, aumentan con la disminución de la temperatura y el incremento de la frecuencia de aplicación de carga (J Yan *et al.*, 2014). Es importante destacar que

Tabla 5.1-4. Módulos de las mezclas con diferentes contenidos de emulsión a 3 temperaturas y 4 frecuencias en MPa.

Temperatura [°C]		5°C				25°C				40°C			
Frecuencia [Hz]		0,5	1	2	4	0,5	1	2	4	0,5	1	2	4
Emulsión [%]	2,4	2921,1	3122,9	3383,2	3693,9	1856,8	2043,2	2224,5	2375,2	580,4	645,25	735,5	823,6
	3,2	3124,8	3360,1	3578,8	3824,1	1677,6	1823	2035,1	2320,9	972,9	1071,2	1176,4	1343
	4,0	3418,4	3682,9	4007,2	4303,9	1621,4	1830	2045,1	2323,5	684,47	779,77	878,93	994,7
	4,8	2967,6	3233,6	3559,7	3942,3	1372,5	1551,9	1785,5	2048,1	561,8	608,47	713	806,9

Módulo de Rigidez a 5°C

En la [Fig 5.1-7](#) se presentan los módulos de rigidez a 5°C. A esta temperatura, el porcentaje de emulsión que tiene mayor módulo de rigidez es 4%. Por lo tanto, a esta temperatura, sería adecuado el uso de esta proporción de emulsión para garantizar que a una frecuencia de carga de 2Hz se obtenga al menos, un módulo de rigidez de 4000MPa, siempre y cuando se garantice que este módulo no provoque una rigidez contraproducente que se convierta en daños en términos de la fisuración térmica.

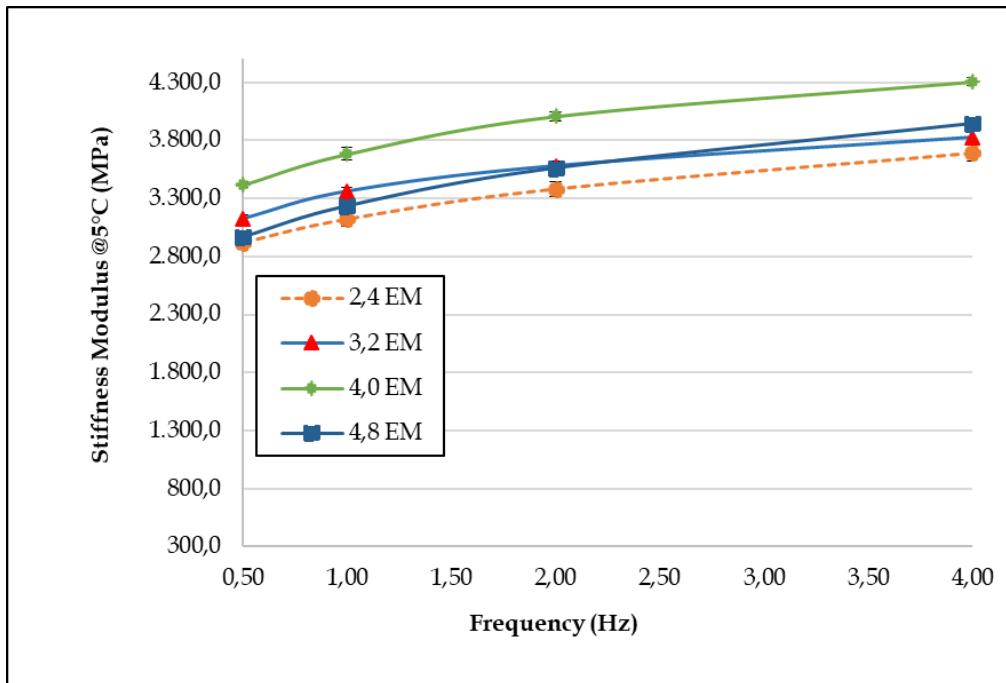


Fig 5.1-7. Gráfica de Módulo de Rigidez a 5°C para optimización del contenido de Emulsión

Módulo de Rigidez a 25°C

Como se observa en la [Fig 5.1-8](#), la cual representa el módulo de rigidez a 25°C, tanto los porcentajes de 3,2 y 4,0% tienen resultados similares, pero 3,2 presenta un módulo mayor en la frecuencia de aplicación de carga más baja (0,5Hz), sin embargo el porcentaje de emulsión que presenta la mayor rigidez es 2,4%, similar al óptimo contenido de emulsión teórico que es 2%. Por lo tanto, a esta temperatura, sería adecuado el uso de esta proporción de emulsión baja (2,4%) para garantizar que a una frecuencia de carga de 2Hz se obtenga al menos un módulo de rigidez de 2200MPa.

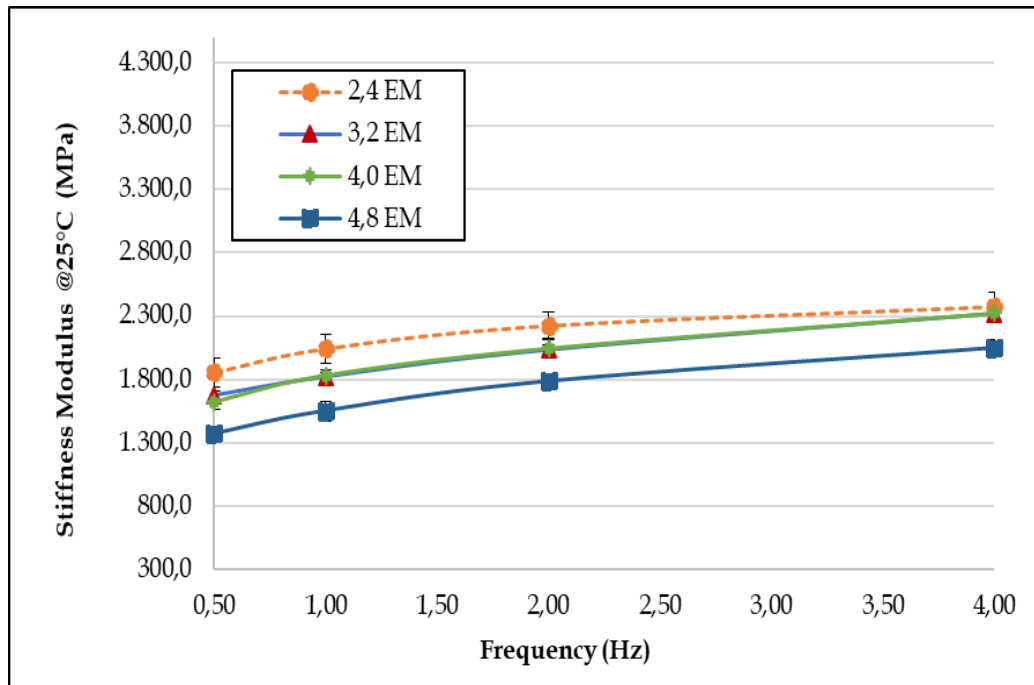


Fig 5.1-8. Gráfica de Módulo de Rigidez a 25°C para optimización del contenido de Emulsión.

Módulo de Rigidez a 40°C

En la [Fig 5.1-9](#), se observa que a 40°C el porcentaje de emulsión que presenta el mayor módulo de rigidez es 3,2%. Por lo tanto, a esta temperatura, sería adecuado el uso de esta proporción de emulsión para garantizar que a una frecuencia de carga de 2Hz se obtenga al menos un módulo de rigidez de al menos 1176,4MPa. Siendo esta la temperatura a la que puede llegar el pavimento en condiciones de funcionamiento en una ciudad como Barranquilla, este porcentaje de emulsión puede ser el más apropiado a utilizar.

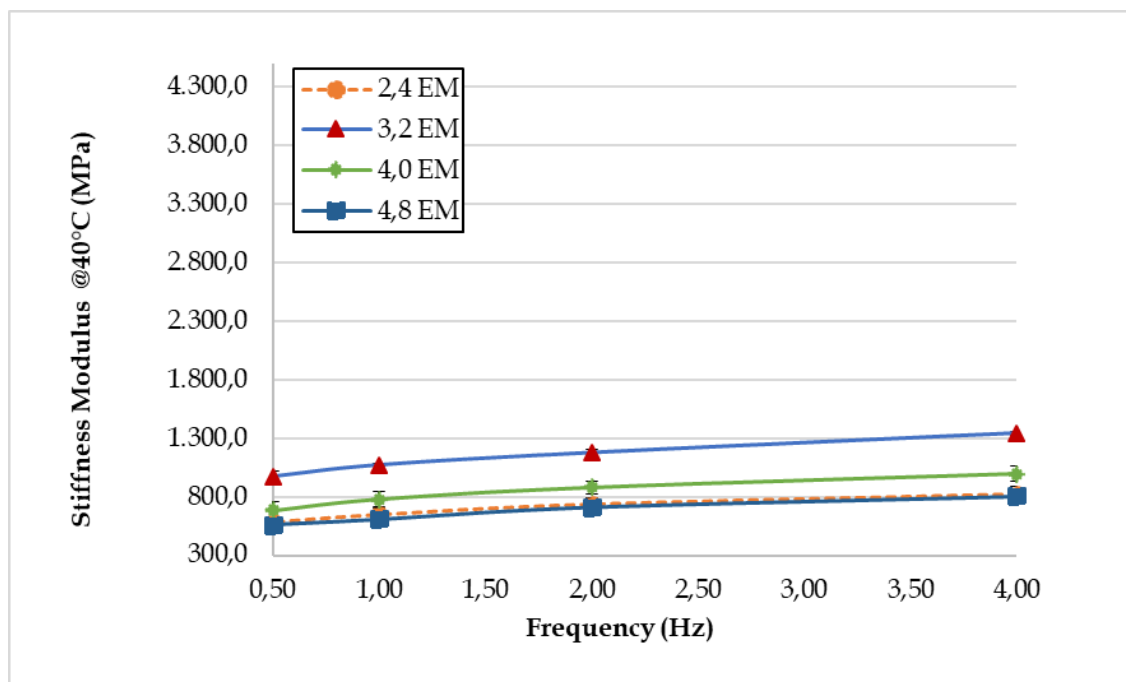


Fig 5.1-9. Gráfica de Módulo de Rigidez a 40°C para optimización del contenido de emulsión.

Para los datos presentados del módulo de rigidez en función de la temperatura, frecuencia y porcentaje de emulsión se realizó el modelo de regresión múltiple mostrado en la Tabla 5.1-5, la cual tiene un coeficiente de determinación R^2 de 0,88. Este modelo es coherente con el comportamiento real de la mezcla, por el valor de los coeficientes, dado que con el incremento en la temperatura, el módulo disminuye y con el aumento de la frecuencia y el contenido de emulsión el módulo de rigidez aumenta.

Tabla 5.1-5. ANOVA tres factores del módulo de rigidez.

	Coefficientes	Valor P
Intercepción	0	#N/A
Temperatura (°C)	-57,15841111	6,37016E-09
Frecuencia (Hz)	337,0427964	0,00035309
Emulsión (%)	728,9048928	1,11099E-13

Los resultados del ANOVA de tres factores revelaron el efecto significativo (valor de $p < 0.0001$) de la temperatura, la frecuencia de aplicación de carga y el porcentaje de emulsión en el valor del módulo de rigidez en el rango experimental de 2.4% a 4,8%.

Curvas maestras para mezclas para optimización de la emulsión

Con los resultados del módulo de rigidez de rigidez de rigidez, se construyeron curvas maestras para cada tipo de mezcla, a través de un Modelo Sigmoidal En la [Fig 5.1-10](#) se presentan las curvas maestras para los distintos contenidos de emulsión. Observando este gráfico, se puede afirmar que la curva con 3,2% de emulsión, tiene el módulo más alto a alta frecuencia de carga a la temperatura de referencia de 25°C, mientras que a bajas frecuencias todas las mezclas tienen módulos similares. Del porcentaje de emulsión de 2,4% se puede decir que presenta el módulo más bajo a altas frecuencias mientras que los porcentajes de 4% y 4,8% presentan módulos menores que para 2% y 3,2% y muy cercanos entre ellos.

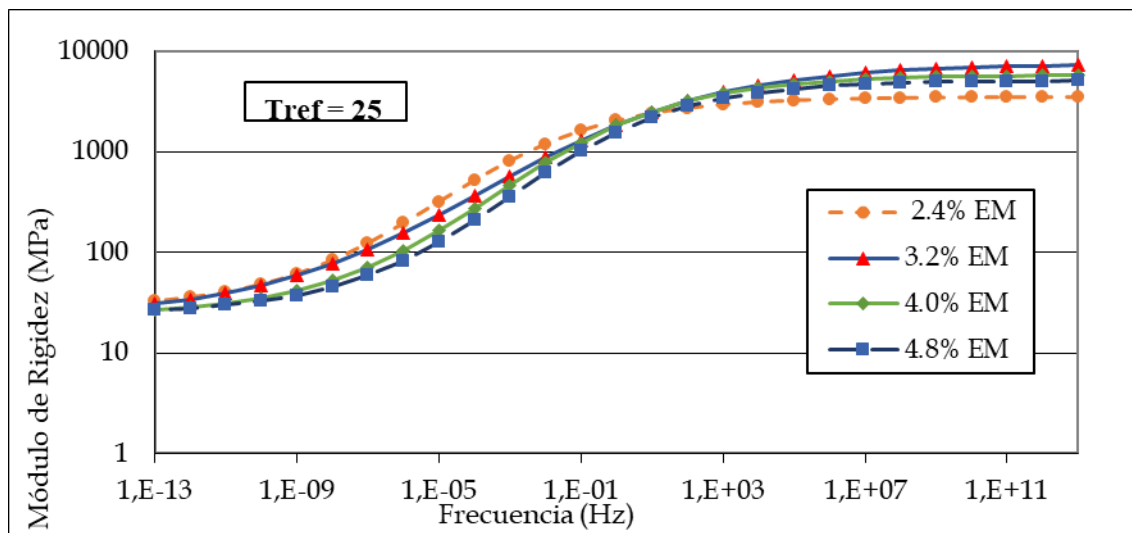


Fig 5.1-10 Curvas maestras para el módulo de rigidez de mezclas con distintas dosificaciones de emulsión

5.1.5.3. Resistencia a la tracción indirecta

En la Fig 5.1-11 se muestran los datos de resistencia a la tracción indirecta húmeda y seca de las mezclas con distintos porcentajes de emulsión y dos mezclas que fueron probadas con el propósito de analizar la influencia del cemento en las mezclas. Se observa que las mezclas con contenido de emulsión de 3,2% muestran una resistencia a la tracción indirecta húmeda mayor a 225 kPa, el cual es un requisito mínimo de resistencia (Wirtgen Group, 2012). Adicionalmente se observa por la diferencia entre la mezcla 0C_3,2EM Y 1C_3,2EM, que se genera un incremento de 161,25MPa a 242MPa el ITS Húmedo y de 242MPa a 287MPa el ITS Seco, es decir 33% y 16% respectivamente, lo cual es producto de la adición de 1% cemento a la mezcla.

De los resultados de resistencia a la tracción indirecta húmeda y seca, se recomienda que el cemento sea utilizado como filler de aporte estructural en una baja proporción como lo es el caso aplicado (1%) con el objetivo de mejorar la resistencia al daño por humedad en todas las mezclas recicladas en frío con emulsión.

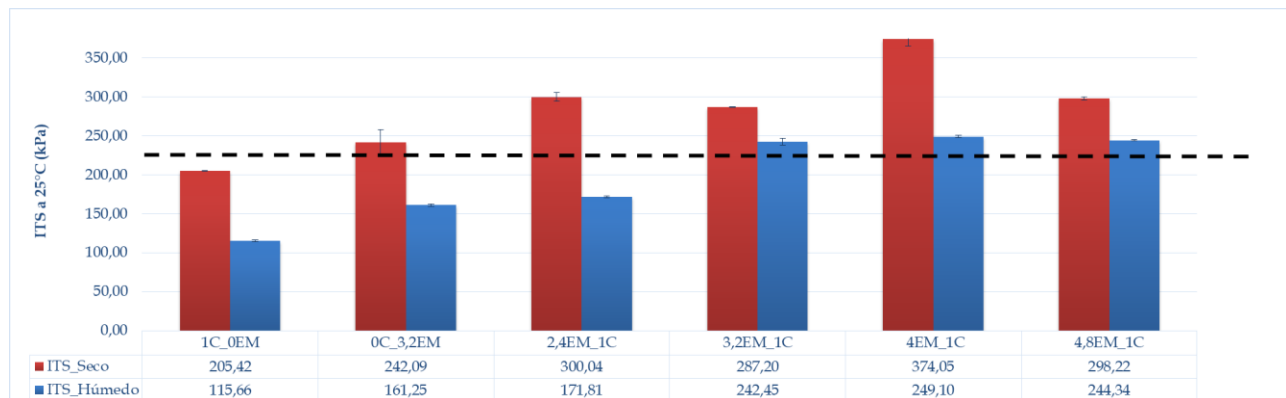


Fig 5.1-11. Resistencia a la tracción indirecta seca y húmeda en mezclas con distintas dosificaciones de emulsión y cemento.

5.1.6. Escogencia del óptimo contenido de emulsión

Con base en los resultados analizados anteriormente, se escoge la mezcla con 3,2% de emulsión y 1% de cemento como la mezcla óptima, debido a que es el mínimo contenido de emulsión que presenta resultados aceptables en propiedades dinámicas, mecánicas y volumétricas, y cumple con los requisitos mostrados en la Tabla 5.1-6. Se demostró experimentalmente que el cemento provee un incremento de la resistencia de la mezcla por sus propiedades aglutinantes y de densificación acorde con lo que muestran los investigadores (Giuliani and Rastelli, 2004; Jinhai Yan *et al.*, 2014; Arimilli, Jain and Nagabhushana, 2016).

Adicionalmente, luego del proceso de optimización, para realizar un análisis más profundo se decidió añadir un segundo grupo de mezclas con caucho con un porcentaje de emulsión superior (3,45%) para compensar la adición de caucho en diferentes proporciones en las mezclas de estudio. Por lo tanto, se presentarán a continuación todos los resultados para una mezcla con 3,2% de emulsión y una mezcla con 3,45% de emulsión.

Tabla 5.1-6. Requisitos de resistencia encontrados en la literatura para mezclas recicladas en frío con emulsión.

	Ensayo	Fuente	Material	Criterios mínimos de resistencia para OEC	Valor
Resistencia	Inmersión-Compresión	INVE 622-13	Material granular vírgen.	Resistencia de probetas curadas en seco Rs (kPa)	1500
		(INVIAS , 2013)	Base estabilizada con emulsión asfáltica		
			BEE-25 BEE-38 ART. 340-13	Resistencia conservada (%)	50
	Resistencia a la tracción indirecta	(Wirtgen GmbH, 2012)	Reciclaje en frío con emulsión asfáltica	ITS_seco (kPa)	225
				ITS_húmedo (kPa)	100
	Resistencia a la tracción indirecta	(Asphalt Academy, 2009)	Materiales estabilizados con productos bituminosos	ITS_seco (kPa)	225
				ITS_húmedo (kPa)	100
	Módulo a tracción indirecta	(Asphalt Academy, 2009)	Reciclaje en frío con emulsión asfáltica	ITSM (MPa) 20°C	2000

6. Resultados y Análisis de Resultados

En este capítulo se presentan uno a uno los ensayos realizados en la caracterización volumétrica, dinámica y mecánica de las muestras del estudio. Todos los ensayos fueron realizados a las muestras tras finalizado el período de curado de 72h a 40°C.

6.1. Gravedad específica máxima de la mezcla

En la

[Fig 6-1](#) se presentan los resultados de la Gravedad específica Máxima (Gmm) para las mezclas con las dosificaciones de caucho o calamina. Con relación a la adición de caucho de llanta se observa una leve disminución de la Gmm con el incremento del contenido de caucho en las mezclas con ambos contenidos de emulsión. Sin embargo, los valores $P < 0.05$ indican que el caucho genera diferencias significativas en la gravedad específica máxima, los resultados del análisis de varianza se encuentran en la sección de anexos en la sección 10.1. Esto puede deberse a que el caucho tiene un efecto directo en la densidad la mezcla, por ser un material con una baja densidad que ocupa un volumen superior al de la misma fracción en masa de agregado (State of California Department of Transportation, 2006).

En cuanto a las mezclas con calamina, se observa que con el incremento del contenido de calamina la Gmm incrementa. Se puede afirmar que este incremento es significativo con una confianza del 95% (ver tabla anova en la sección 10.1). Este incremento se puede explicar debido a la tipología del material debido a que tiene un alto contenido de hierro 71.93%. Además, por la granulometría de la calamina es un material capaz de llenar los vacíos menores de 0,425mm de la mezcla (ver curva granulométrica mostrada en la [Fig 3.4-3](#)).

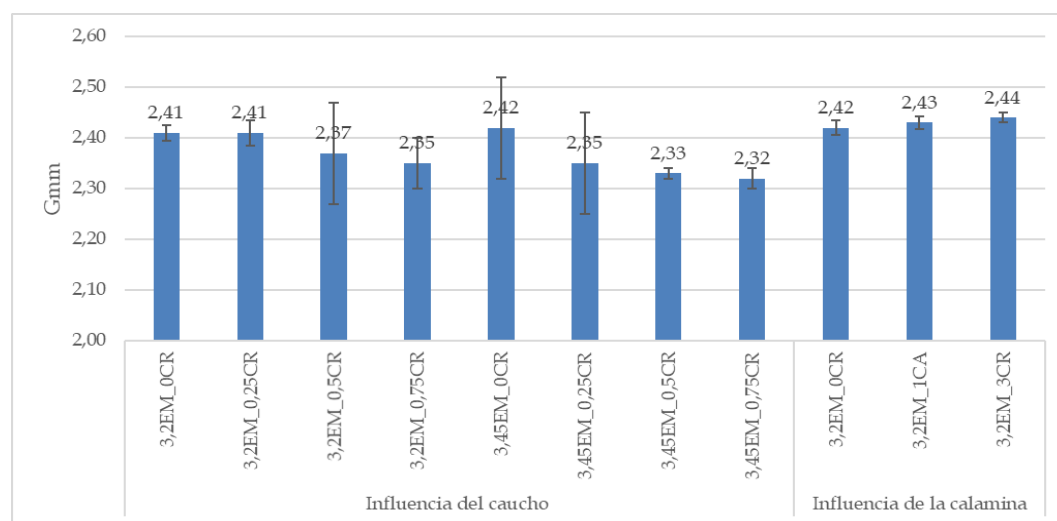


Fig 6-1 Gmm para las mezclas con caucho y calamina en función del tipo de mezcla en compactación Marshall.

6.2. Gravedad específica bulk de los especímenes Gmb

En la Fig 6-2 se presentan los valores de gravedad específica bulk para las mezclas con caucho y calamina fabricadas por compactación Marshall. Para todas las briquetas de una misma mezcla se calculó el promedio y la desviación estándar para la serie de datos. Por los resultados del análisis de varianza se encontró que los valores P son menores que 0.05, por lo que se puede afirmar que el caucho no influye en la variable gravedad específica bulk cuando los especímenes son compactados por compactación Marshall (ver sección de anexos 10.1.1).

Por otro lado, cuando los especímenes son compactados por el método Giratorio, los valores P del análisis de varianza son todos superiores a 0.05 (sección 10.1.1) por lo que la inclusión de caucho genera diferencias significativas en la Gravedad específica bulk, lo cual puede atribuirse al amasado o presión de compactación con el control de la inclinación que se genera en este tipo de compactación.

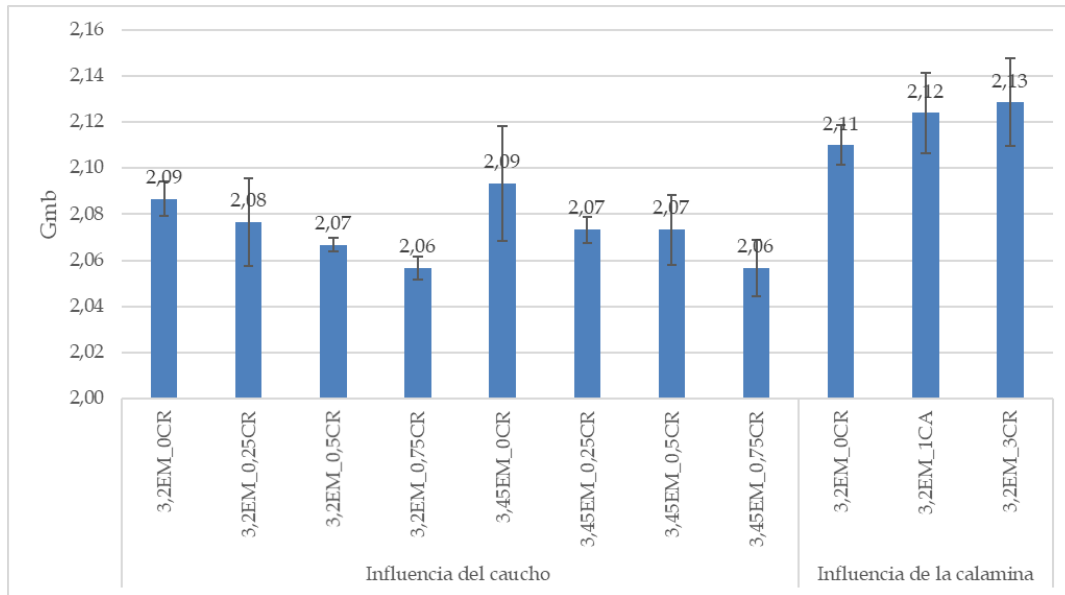


Fig 6-2. Gravedad específica Bulk para las mezclas con caucho y calamina compactación Marshall

Los resultados de la Gravedad específica bulk para las muestras con caucho de los dos grupos de especímenes fabricados por compactación Marshall y Giratoria se muestran en la

Fig 6-5 Fig 6-5. Se observa en general que el método de compactación Giratoria arroja valores mayores de Gmb tanto para la adición de caucho como para la adición de calamina. Esto puede atribuirse a que el efecto de amasado que caracteriza la compactación giratoria incrementa la densidad de los especímenes y este efecto se intensifica en las muestras con mayor contenido de emulsión debido a que hay mayor lubricación en las partículas (Lee, Yongjoo and Byunghee,

2009). El efecto que genera el compactador giratorio con 180 giros ha demostrado que permite obtener densidades similares a las obtenidas en campo (Sangiorgi *et al.*, 2017). En esta investigación se encontró que se encuentran densidades superiores con respecto a las encontradas con encontradas en el compactador Marshall como porcentaje de la densidad máxima, mostrados en las Fig 6-3 y Fig 6-4. Para cada mezcla además se encontró el nivel de compactación del espécimen recién compactado a través de la comparación del número de giros con el porcentaje de compactación con respecto a la densidad máxima teórica (ver modelos de compactación en los anexos en la sección 10.1.3. Estos valores indican que el número de giros escogido fue adecuado para incrementar la densidad de las mezclas, como se muestra en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1. Densidad con respecto a la gravedad específica máxima teórica del espécimen recién compactado.

	Densidad /Gmm [%]	
	Giratorio	Marshall
3,2EM_0CR	91,1	89,6
3,2EM_0,25CR	92,8	89,4
3,2EM_0,50CR	93,4	90,9
3,2EM_0,75CR	92,6	91,3
3,45EM_0CR	92,7	91,2
3,45EM_0,25CR	91,9	91,7
3,45EM_0,50CR	93,9	91,9
3,45EM_0,75CR	96,4	95,2

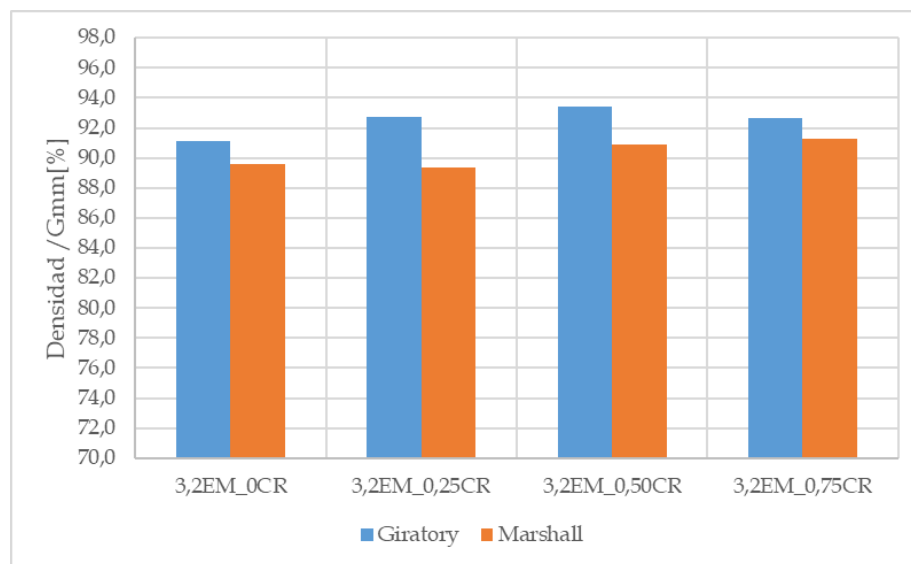


Fig 6-3. Densidad/Gmm [%] de las briquetas Marshall versus Compactación Giratoria con 3,2% de emulsión.

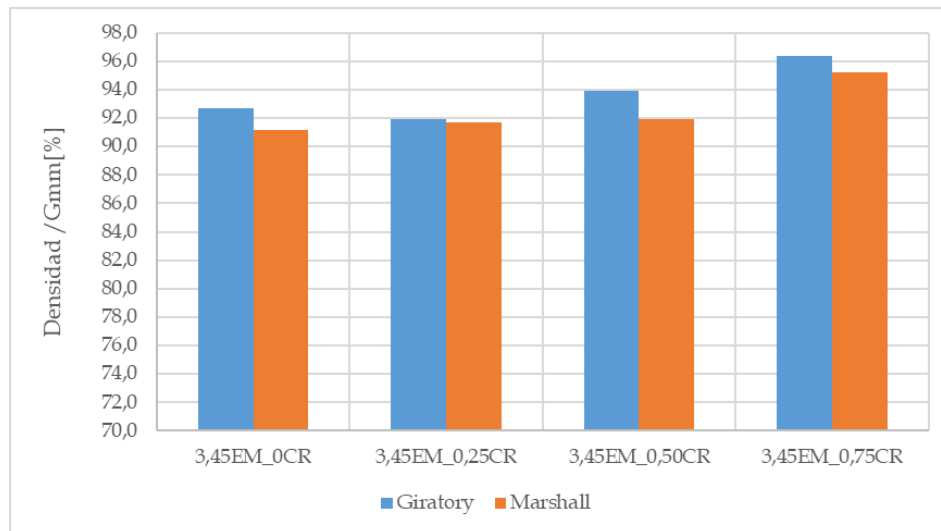


Fig 6-4. Densidad/Gmm [%] de las briquetas Marshall versus Compactación Giratoria con 3,45% de emulsión.

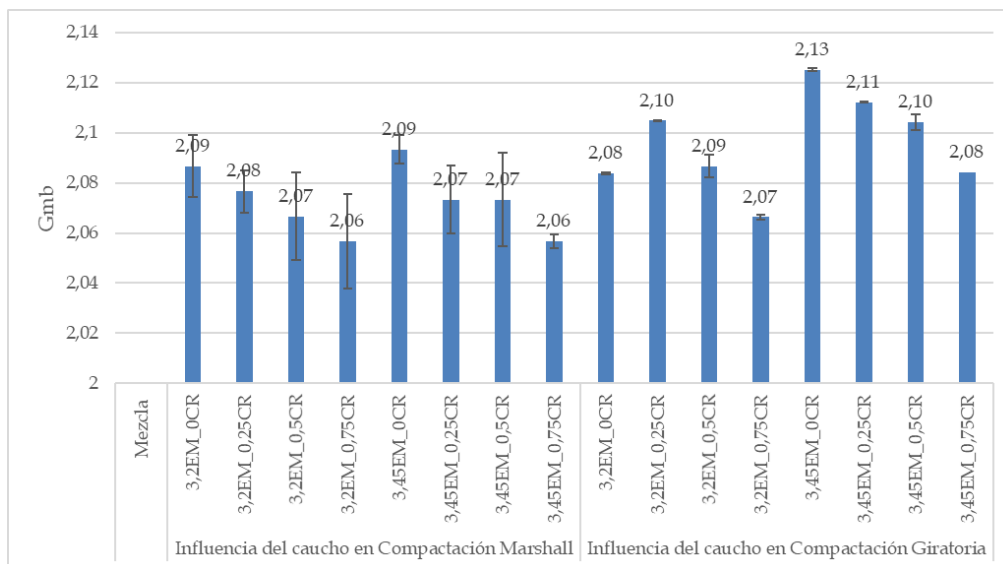


Fig 6-5. Gravedad específica Bulk para briquetas con caucho fabricadas por Compactación Marshall vs Compactación Giratoria.

6.3. Gravedad específica aparente

En la [Fig 6-6](#) se encuentra la gravedad específica aparente a todas las briquetas de una misma mezcla y se calculó el promedio y la desviación estándar para la serie de datos. Se observa

que la gravedad específica aparente disminuye con el incremento del contenido de caucho y aumenta con el contenido de calamina, similar a lo observado para la Gmm y Gmb.

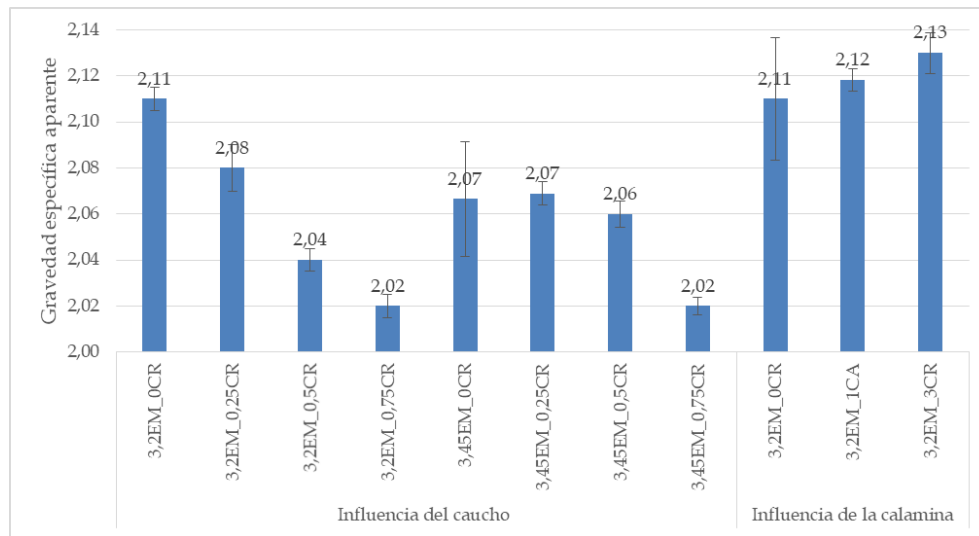


Fig 6-6. Gravedad específica Aparente para las mezclas con caucho y calamina fabricadas por compactación Marshall

Los resultados de las muestras compactadas por el método Marshall y el Giratorio se muestran en la [Fig 6-7](#). Se observa en general que el método de compactación Giratoria arroja valores mayores de Gmb tanto para la adición de caucho como para la adición de calamina. En los resultados se puede observar que la gravedad específica bulk y la gravedad específica aparente, independientemente del método de compactación utilizado, disminuyen con el incremento de caucho y aumentan con el contenido de calamina, similar a lo presentado en el caso de la Gmb. Es importante explicar que la gravedad específica aparente o “geométrica es superior a la gravedad específica bulk debido a que se considera la geometría del espécimen para calcular su volumen. Así es como los resultados presentados son superiores en promedio 1%.

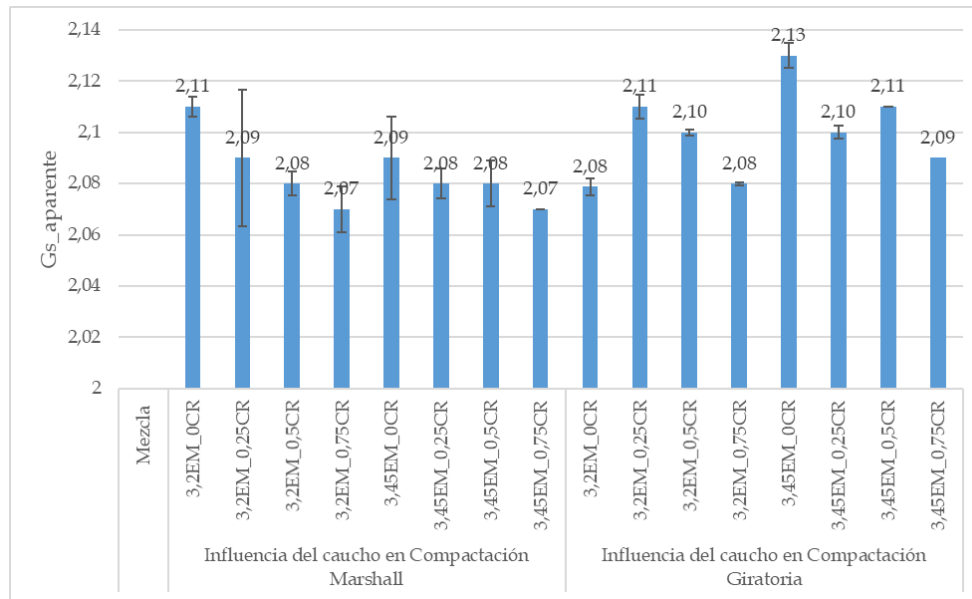


Fig 6-7 Gravedad específica aparente para briquetas con caucho fabricadas por Compactación Marshall vs Compactación Giratoria.

6.4. Contenido de Vacíos

La mayoría de las mezclas compactadas por método Marshall tienen un contenido de vacíos promedio de 13% (ver [Fig 6-8](#)). El cual está entre 9 y 14% parámetros mínimo y máximo definidos por varias metodologías para mezclas en frío como: Marshall modificado (método A), Hveem (método B), Oregon (método C), y California (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2013). Sin embargo, se puede observar que en el caso del caucho tienen un contenido de vacíos en algunos casos superiores a 13% en comparación con las mezclas con calamina, debido a que la gradación de la calamina es más fina: 60% pasa el tamiz de 0,425mm en comparación con 0,54% en la gradación del CR. Esto quiere decir que cuando partículas finas se añaden a una matriz de partículas de gran tamaño, la proporción de vacíos en general disminuye, haciendo que la densidad de la mezcla aumente, lo cual se vio reflejado en la Gravedad específica bulk Gmb y a gravedad específica aparente (State of California Department of Transportation, 2006; S. Lee, Akisetty and Amirkhanian, 2008; Hassan *et al.*, 2014).

Las mezclas con mayor contenido de emulsión y compactadas de forma Giratoria tuvieron una disminución en el contenido de vacíos a un valor de 10%, esto se puede atribuir al efecto de organización de las partículas en un paquete más denso por el amasado durante la compactación que permite la obtención de vacíos constantes, además de tener una mayor lubricación por el incremento en la emulsión (Lee, Yongjoo and Byunghee, 2009)(ver [Fig 6-9](#)). Este efecto es un beneficio alto para las mezclas en frío ya que característicamente presentan un alto contenido de vacíos provocado porque, durante el mezclado la emulsión asfáltica se rompe parcialmente a

temperatura ambiente, lo que genera un contenido de vacíos llenos de aire superiores a las mezclas en caliente (Thanaya, Zoorob and Forth, 2009).

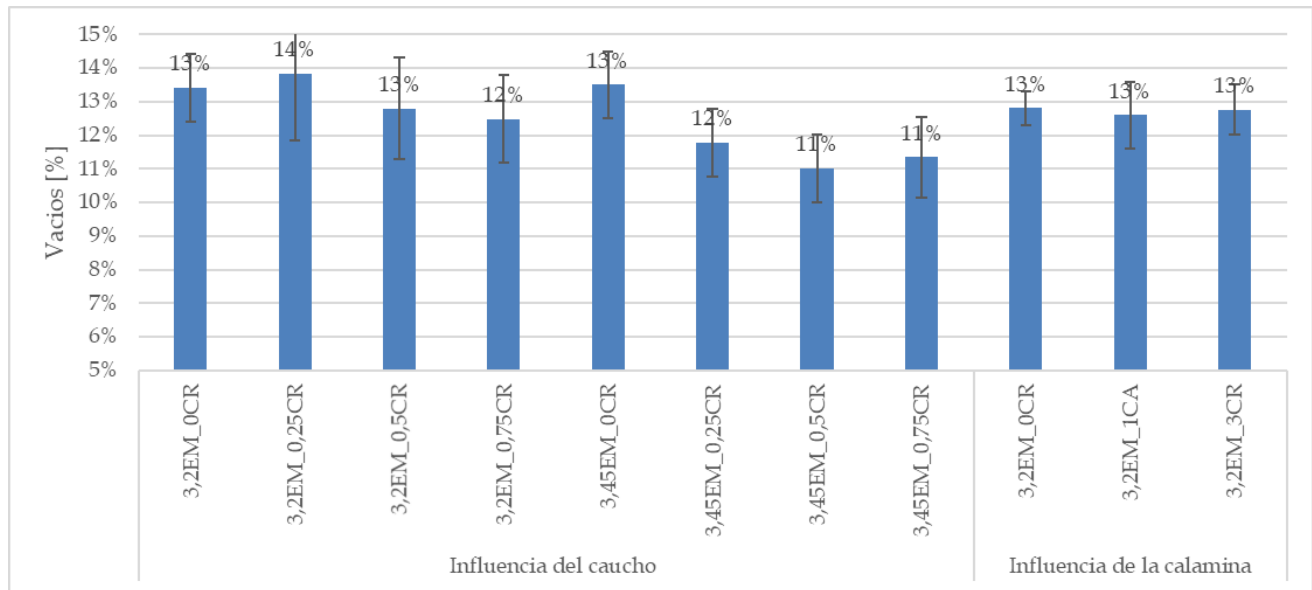


Fig 6-8. Contenido de vacíos en briquetas fabricadas por compactación Marshall

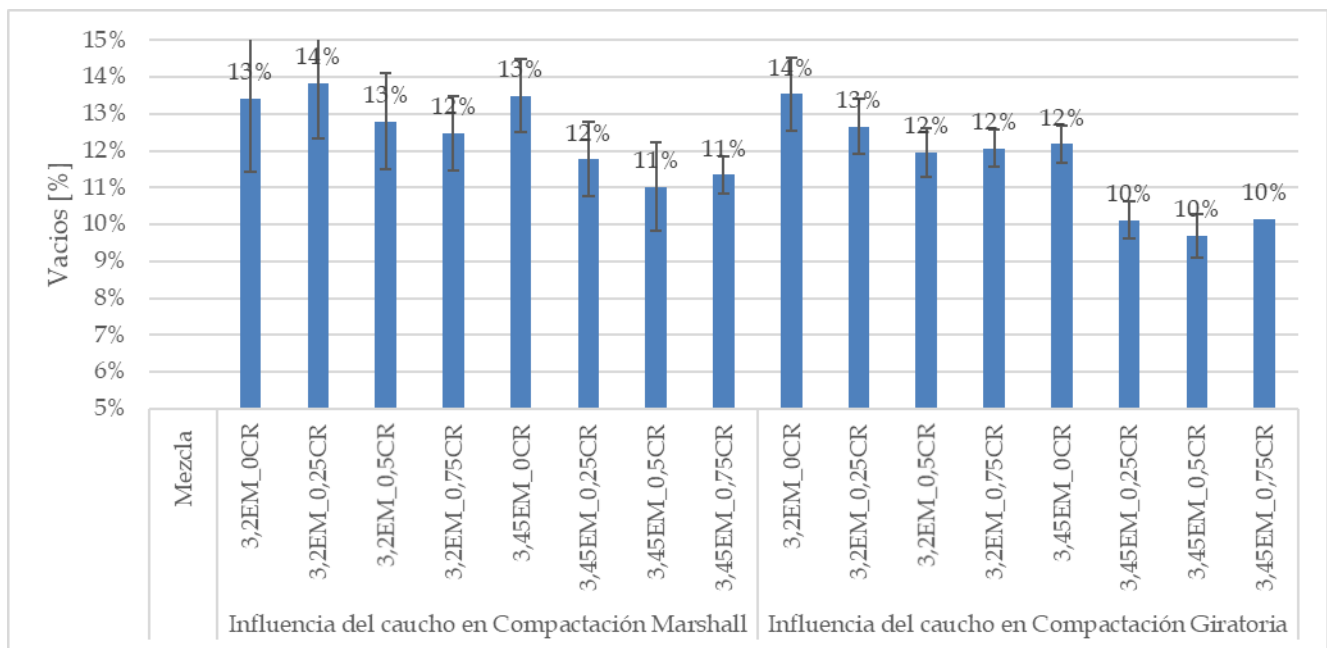


Fig 6-9. Contenido de vacíos en briquetas fabricadas por compactación Marshall versus Giratoria

6.5. Ensayos dinámicos

6.5.1. Módulo de Rigidez

Los ensayos de módulo de rigidez se realizaron por triplicado para cada mezcla y se presentan agrupados por la temperatura empleada en el ensayo 5°C, 25°C y 40°C, en las frecuencias ensayadas de 0.5, 1, 2 y 4 Hz. Los valores del módulo de rigidez son analizados para determinar el efecto del porcentaje de caucho o calamina, además del tipo de compactación empleado en la fabricación de las muestras.

Para analizar la relación del módulo de rigidez con la variación de temperatura, frecuencia de aplicación de carga y las dosificaciones de caucho y calamina se utilizó el análisis de varianza ANOVA. Este análisis nos permite definir si existe una influencia significativa de las variables analizadas con el módulo de rigidez, comparando la mezcla control (0% caucho ó calamina) con los distintos contenidos utilizados, los cuales se presentan en las secciones siguientes.

6.5.1.1. Efecto del Caucho en el Módulo de Rigidez - Compactación tipo Marshall

En la Tabla 6-2 se presentan los resultados del análisis ANOVA de seis factores que se realizó para determinar el efecto de la temperatura, frecuencia de carga, porcentaje de emulsión, el porcentaje de caucho, la densidad bulk y el contenido de vacíos sobre los módulos de las mezclas recicladas en frío fabricadas por compactación Marshall. Se escogió como variables independientes la temperatura, la frecuencia, el porcentaje de emulsión, el porcentaje de caucho, la densidad y el porcentaje de vacíos y como variable dependiente el módulo de rigidez.

El uso del CR en las mezclas condiciona los valores de ITSM con ambos contenidos de emulsión y a todas las temperaturas y frecuencias estudiadas. Lo cual se demuestra por los P-valores presentados <0.0005, que indican que de las variables indicadas como independientes sólo tienen un efecto significativo en la variable respuesta la temperatura, la frecuencia, y el porcentaje de vacíos.

Tabla 6-2. Resultados del análisis de varianza ANOVA de la prueba de módulo de rigidez para muestras compactadas por compactación Marshall.

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Valor P</i>
<i>Intercepción</i>	0	#N/A	#N/A	#N/A
<i>Temperatura (°C)</i>	-56,33399	2,3058129	-24,43129	1,71571E-41
<i>Frecuencia (Hz)</i>	137,19606	24,662098	5,5630327	2,69697E-07
<i>Emulsión (%)</i>	111,72758	365,41302	0,305757	0,760495797
<i>CR (%)</i>	941,41362	894,17637	1,0528277	0,295238449
<i>Densidad (g/cm3)</i>	6526,7396	6008,9761	1,086165	0,280306621
<i>Vacíos (%)</i>	-1032,17	158,09405	-6,528832	3,83091E-09

En la

Fig 10-10~~Fig 10-10~~ y

Fig 10-11~~Fig 10-11~~ se presentan los módulos de rigidez a 5°C de las mezclas con 3,2% y 3,45% emulsión. En las mezclas de control se puede apreciar un incremento de los módulos con el incremento del contenido de emulsión. Adicionalmente, los resultados indican que la reducción del módulo inducida por el caucho es mayor con 3,45% de emulsión en ambas temperaturas, debido a que los módulos con 3,2% se disminuyen un 36% en el caso de la mezcla 3.2EM_0.25CR mientras que en la mezcla 3.45EM_0.75CR se disminuyen un 50%.

En la

Fig 10-12~~Fig 10-12~~ y Fig 10-13~~Fig 10-13~~ se presentan los módulos de rigidez a 25°C de las mezclas con 3,2% y 3,45. Al igual que a 5°C en las mezclas de control se puede apreciar un incremento de los módulos con el incremento del contenido de emulsión. A 25°C que el módulo se ve reducido mayormente en las mezclas con 3.2% de emulsión, en dónde la mayor disminución se presentó en la mezcla 3,2EM_0,75CR con un valor de 57%.

Por otro lado, a la temperatura de 40°C, se presentan en las

Fig 10-14~~Fig 10-14~~ y

Fig 10-15~~Fig 10-15~~. Estos indican que para el contenido de emulsión de 3,2 en general el módulo se mantiene con el incremento del contenido de caucho y para el 3,45% se disminuye gradualmente. Esto puede indicar que la temperatura alta tiene un efecto distinto en las mezclas que permite que los módulos con el contenido de emulsión óptimo (3,2%) mantengan su módulo de rigidez y no se vean tan afectados por la temperatura.

El módulo de rigidez se ve afectado en función de la temperatura de ensayo por la adición de caucho reciclado. A 5°C y 25°C la tendencia es a la disminución de los módulos sin embargo a 40°C las mezclas con caucho presentan una disminución de aproximadamente 33% con respecto a la mezcla control, pero la diferencia entre las mezclas con caucho no supera el 7%, se mantiene en el orden de 680,9±29,12MPa. Esto permite concluir que la adición de caucho de llantas en mezcla recicladas adicionadas con caucho en seco podría mejorar las propiedades de resistencia a la deformación permanente a alta temperatura (40°C a 60°C) (Cao, 2007b). La mezcla con mayor módulo de rigidez es la mezcla control con 3.45EM_0CR, es decir la mezcla con mayor contenido de emulsión a 5°C y 4Hz con un valor de 4659,3 ±146.2MPa y la mezcla con menor módulo de rigidez es la mezcla con 3.45% de emulsión y 0.75% de caucho es la mezcla con 0.25% caucho a 0.5Hz de frecuencia y 40°C de temperatura.

6.5.1.2. Efecto del Caucho en el Módulo de Rigidez - Compactación tipo Giratoria

En la Tabla 6-3 se presentan los resultados del análisis ANOVA utilizando los mismos factores que la compactación Marshall pero en este caso para las muestras fabricadas por compactación Giratoria. Se escogieron las mismas variables independientes que en la compactación Marshall con la variable dependiente del módulo de rigidez.

El uso del CR en las mezclas condiciona los valores de ITSM con ambos contenidos de emulsión y a todas las temperaturas y frecuencias estudiadas. Lo cual se demuestra por los P-valores presentados <0.0005 , que indican que de todas las variables indicadas como independientes tienen un efecto significativo en el módulo de rigidez excepto la densidad y el contenido de vacíos los cuales tienen valores P superiores a 0,0005.

Tabla 6-3. Resultados del análisis de varianza ANOVA de la prueba de módulo de rigidez de rigidez para muestras compactadas por compactación Giratoria

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A
Temperatura (°C)	-47,49943	2,8544322	-16,64059	3,3036E-29
Frecuencia (Hz)	150,79065	30,530082	4,9390843	3,5964E-06
Emulsión (%)	2520,8322	692,94872	3,6378337	0,00045803
CR (%)	-982,1147	207,03204	-4,743781	7,84E-06
Densidad (g/cm3)	-3998,819	1625,5319	-2,460006	0,01580368
Vacíos (%)	21815,278	9423,2171	2,3150563	0,02288424

En la [Fig 10-16](#)Fig 10-16 y [Fig 10-17](#)Fig 10-17 se presentan los módulos de rigidez a 5°C de las mezclas con 3,2% y 3,45% emulsión. En las mezclas control se puede apreciar un incremento de los módulos con el incremento del contenido de emulsión al igual que las mezclas compactadas por el método Marshall. Y con respecto a la inclusión de caucho se aprecia una disminución mayor en el caso de las mezclas con 3.45% de emulsión. El contenido de emulsión tiene un efecto significativo en la compactabilidad de las mezclas debido a que la falta de emulsión podría ocasionar dificultades para revestir el RAP, lo que ocasionaría una mala trabajabilidad y afectaría la capacidad de compactación de las mezclas (Gao, Ni, Ph, *et al.*, 2014).

A 25°C al igual que a 5°C la reducción del módulo inducida por el caucho a 25°C es mayor con 3.45% de emulsión. En las [Fig 10-18](#)Fig 10-18 y Fig 10-11 se observan los datos del módulo de rigidez a 25°C para ambos contenidos de emulsión pero no se evidencia una tendencia clara en los resultados.

Para el caso de 40°C, los resultados del módulo de rigidez se presentan en las [Fig 10-20](#)Fig 10-20 y

[Fig 10-21](#)Fig 10-21. Estos indican que para ambos contenidos de emulsión el efecto del caucho es disminuir el módulo. Esto puede indicar que la temperatura alta tiene un efecto similar en las mezclas compactadas por compactador Marshall debido a que los módulos no varían mucho con el contenido de emulsión. Sin embargo, cabe resaltar que el módulo de rigidez en las mezclas con

adición de caucho al utilizar la compactación giratoria a menor temperatura (5°C) la disminución del módulo con la adición de caucho es mayor en comparación con la temperatura de 40°C. Por ejemplo, a 5Hz, con la adición de 0.25% de caucho, el módulo disminuye un 45%, sin embargo, bajo estas mismas condiciones a 40°C se disminuye solo el 19%.

6.5.1.3. Efecto de la calamina en los módulos de rigidez

En la Tabla 6-4 se presentan los resultados del análisis ANOVA de tres factores que se realizó para determinar el efecto de la temperatura, frecuencia de carga y porcentaje de calamina sobre los módulos de las mezclas recicladas en frío fabricadas por compactación Marshall. Se escogieron las mismas variables independientes que en el análisis con el CR excepto el porcentaje de emulsión que solo se trabajó con 3,2% con la variable dependiente del módulo de rigidez.

Los valores de módulos de rigidez de las mezclas con calamina indican que la temperatura no es un parámetro significativo. Lo cual se demuestra por los P-valores presentados, los cuales indican que la única variable realmente significativa es la frecuencia de carga, con un valor P de $2,60 \times 10^{-6} < 0,0005$.

Tabla 6-4. Resultados del análisis de varianza ANOVA de la prueba de módulo de rigidez de rigidez para muestras con calamina compactadas por compactación Marshall.

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Valor P
Intercepción	0	#N/ A	#N/ A	#N/ A
Temperatura (°C)	-1,709027	10,279532	-0,166255318	0,868970499
Frecuencia (Hz)	773,10434	136,51152	5,663289987	2,60268E-06
Calamina (%)	210,0759	152,69445	1,375792602	0,178152421

En las [Fig 10-22](#), [Fig 10-23](#) y [Fig 10-24](#) se presentan los resultados de los módulos de rigidez a 5°C, 25°C y 40°C, respectivamente. Los resultados indican que la presencia de la calamina reduce el módulo de las muestras a todas las temperaturas. Sin embargo, a también se observa que incrementa el módulo con el aumento de la calamina, siendo los módulos de 3% mayor que 1%. Es por eso que los valores de la tabla ANOVA demuestran que el contenido de calamina y la temperatura no afectan en gran medida los valores del módulo. Como se muestra en las tres gráficas los módulos de 3% de calamina son superiores a los de 1% para todas las temperaturas ensayadas. Cabe destacar que las variaciones son menores en comparación con los presentados con el caucho a pesar de que se utilizaron dosificaciones mayores.

6.5.2. Curvas Maestras

6.5.2.1. Curvas Maestras para mezclas con caucho - Compactación tipo Marshall

En las Fig 6-10 y Fig 6-11 se muestran las curvas maestras construidas para la mezcla control con 3,2% y 3,45% de emulsión, además de las curvas para cada dosificación de caucho compactadas a través del compactador Marshall. Las curvas maestras presentan un buen ajuste al modelo Sigmoidal planteado por su valor de R^2 mayor a 0,9 como se muestra en la Tabla 6-5.

Se adicionó una curva de mezcla en caliente convencional (5,6% de asfalto por diseño Marshall) la cual se muestra en color negro con el fin de comparar las curvas. Se observa que las curvas maestras de las mezclas recicladas en frío tienen una forma menos pronunciada, es decir son más extendidas, por lo tanto tienen una menor pendiente, lo cual demuestra la teoría de que no son tan viscoelásticas como las mezclas asfálticas en caliente (Kim *et al.*, 2009). El valor de parámetro gamma, cuyo valor es menor en las mezclas en frío recicladas que la mezcla en caliente (0,4483), está relacionado con la pendiente de la función Sigmoidal y entre mayor es este valor más apariencia de S tiene la curva (Pellinen, Witczak and Bonaquist, 2004).

En la Fig 6-10 y Fig 6-11, se observa que en comparación con la mezcla en caliente, la curva con mayor rigidez son las curvas control 3,2EM_0CR y 3,45EM_0CR y las de menor rigidez son 3,2EM_0,75CR y 3,45EM_0,75CR. Es decir, en todo el espectro de frecuencias estudiado, el incremento del contenido de caucho, convierte a la mezcla en menos rígida. Para frecuencias reducidas bajas, es decir a tiempos de carga prolongados (temperaturas altas) el módulo es mayor que el de la mezcla en caliente. Por otro lado, a altas frecuencias reducidas es decir tiempos de carga cortos (temperaturas bajas) el módulo de rigidez de las MRF es más bajo que el de MC. Esto demuestra que el caucho convierte a la mezcla en menos rígida a baja temperatura lo cual puede prevenir el agrietamiento y en más rígida a alta temperatura lo que permite prevenir la deformación permanente (Wirtgen, 2004; Pérez, Medina and del Val, 2013; Dondi *et al.*, 2014).

Tabla 6-5. Parámetros de ajuste y R^2 de las curvas maestras de las mezclas con caucho vs mezcla en caliente. Compactación Marshall.

Mét. de Compactación	Mezcla	δ (Log E * min)	β	γ	R^2
Marshall	3,2EM_0,00CR	0,5374	-1,1465	-0,3096	0,9954
	3,2EM_0,25CR	0,4861	-0,6398	-0,2432	0,9896
	3,2EM_0,50CR	0,5042	-0,7526	-0,3070	0,9020
	3,2EM_0,75CR	0,5067	-0,7595	-0,3185	0,9995
	3,45EM_0,00CR	0,5054	-0,7596	-0,2777	0,9340
	3,45EM_0,25CR	0,5345	-1,0817	-0,3201	0,9920
	3,45EM_0,50CR	0,4989	-0,7550	-0,3598	0,9998
	3,45EM_0,75CR	0,5051	-0,7595	-0,3548	0,9683
Marshall	MC_5,6A	0,4982	-0,4830	-0,4483	0,9996

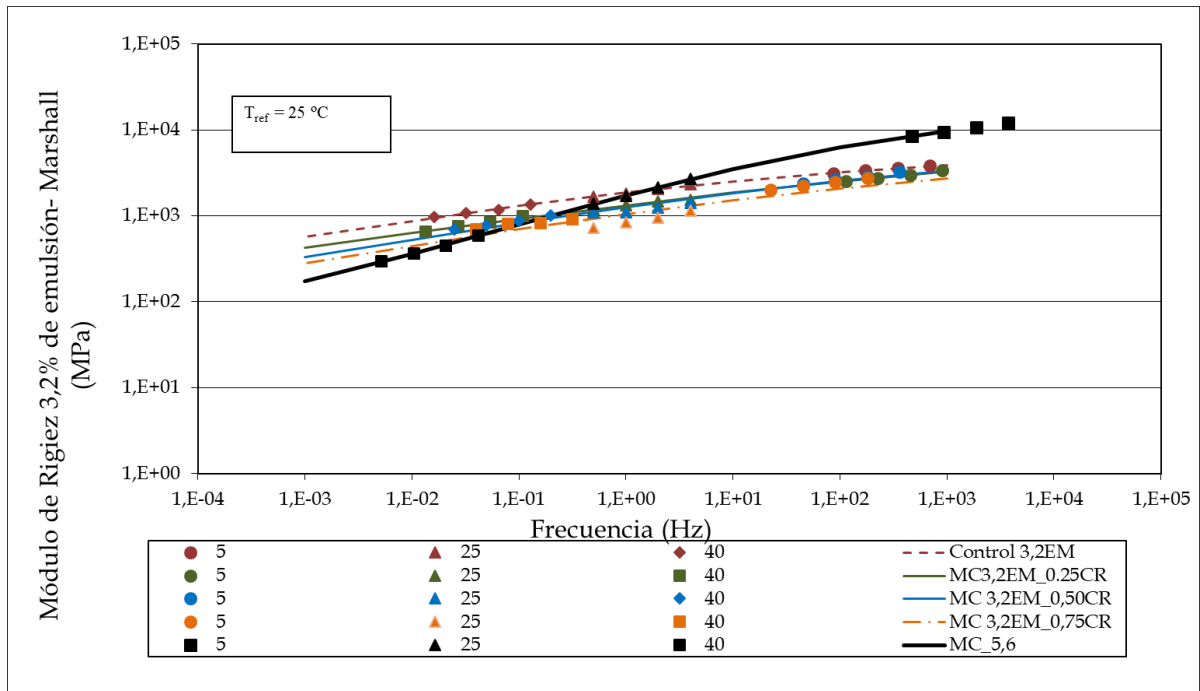


Fig 6-10. Curvas maestras con distintos porcentajes de caucho con 3,2% de emulsión, fabricados por compactación Marshall con la mezcla en caliente.

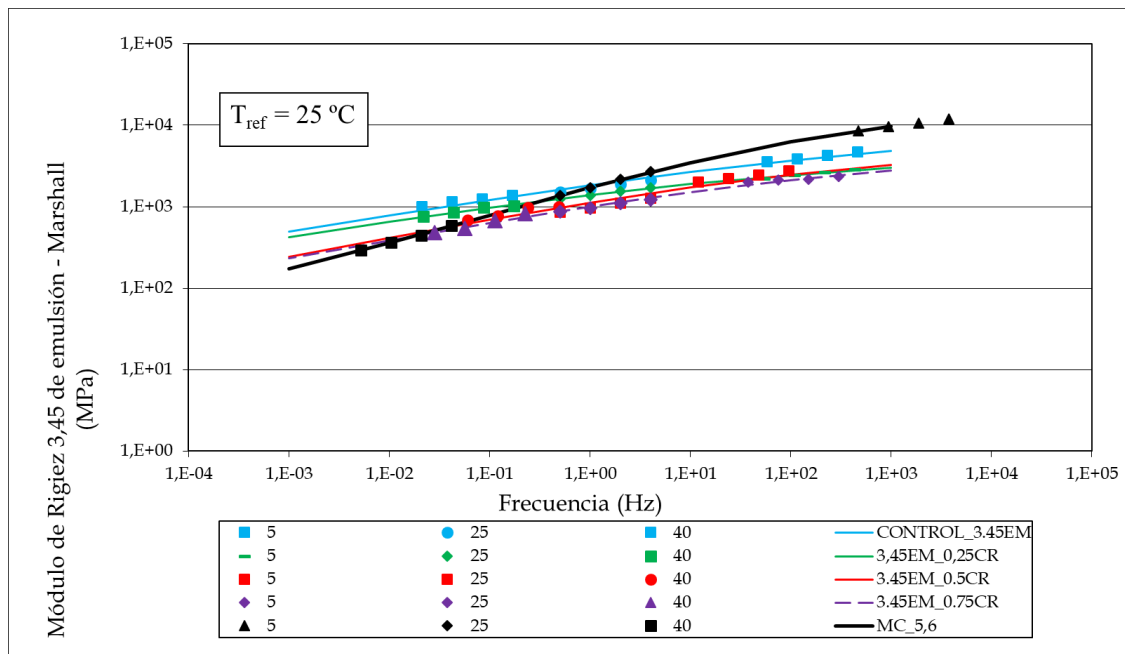


Fig 6-11. Curvas maestras con distintos porcentajes de caucho con 3,45% de emulsión, fabricados por compactación Marshall.

6.5.2.2. Curvas Maestras, mezclas con caucho - Compactación tipo Giratoria

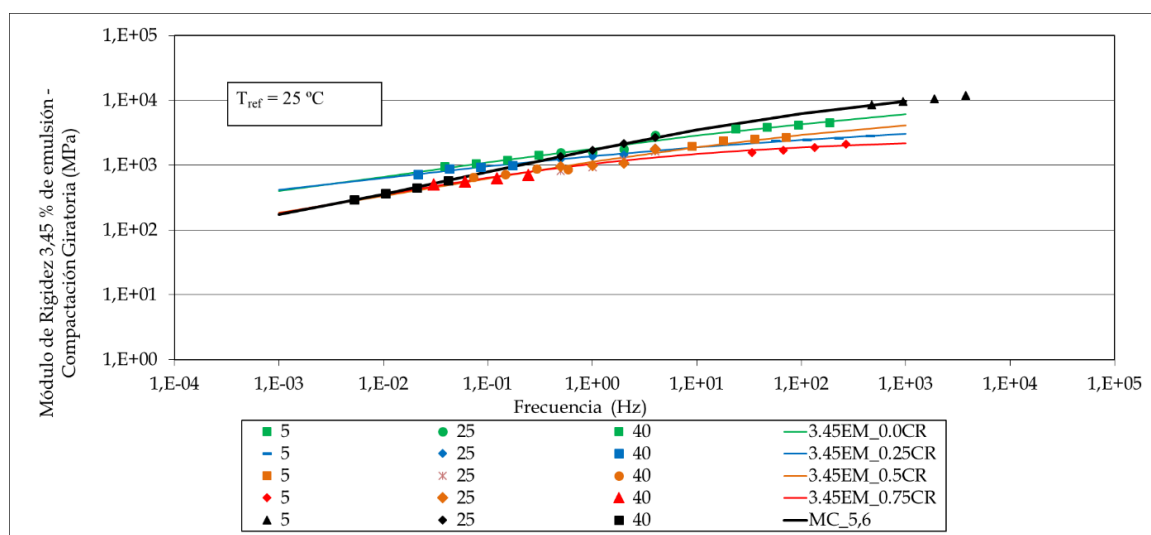
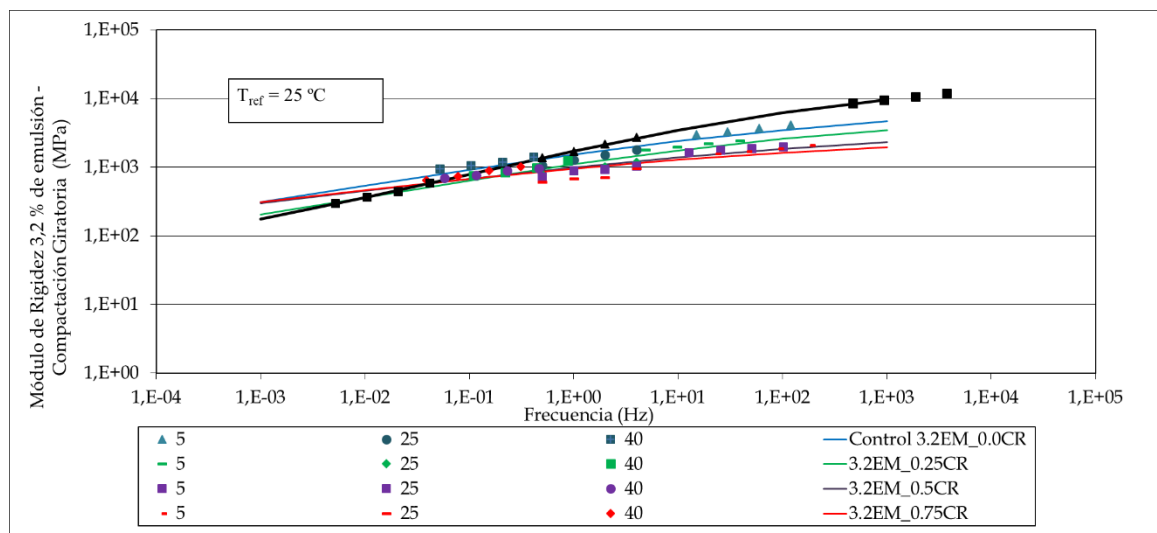
En la Fig 6-12 y Fig 6-13 se muestran las curvas maestras análogas a las construidas anteriormente para la mezcla control con 3,2% y 3,45% de emulsión para los especímenes fabricados en compactador Giratorio. Igual que los datos anteriores, los datos medidos presentan un buen ajuste al modelo Sigmoidal plateado por su valor de R^2 mayor a 0,9 como se muestra en la Tabla 6-6.

Se realizó un análisis igual al realizado en las mezclas compactadas por el método Marshall al compararlas con una mezcla en caliente. Se encontró que, para ambos contenidos de emulsión, en comparación con la mezcla en caliente, la curva con mayor rigidez es la curva control y la de menor rigidez es la mezcla con mayor contenido de caucho (0,75%). Los parámetros gamma de las MRF son más cercanos al valor de la mezcla en caliente con 5,6% (ver Tabla 6-6). Esto permite concluir que el método de compactación influye en el comportamiento viscoelástico de las mezclas dándoles una forma más cercana a la de una curva maestra de mezcla en caliente. Ocurre similarmente que con las mezclas por compactación Marshall, para frecuencias reducidas bajas, el módulo es mayor que el de la mezcla en caliente pero a altas frecuencias reducidas, el módulo de rigidez de rigidez de las MRF es más bajo que el de la MC, (Pérez, Medina and del Val, 2013).

Al igual que lo observado con la compactación Marshall, se tiene un comportamiento más viscoelástico en las mezclas con el contenido de emulsión más alto (3,45%), lo que se evidencia en la Fig 6-12 y Fig 6-13 en que las curvas se asemejan más a la mezcla convencional MC. Esto puede atribuirse a que las mezclas compactadas por compactador giratorio presentaron menores contenidos de vacíos que las mezclas compactadas por el método Marshall (ver sección 6.4 Contenido de Vacíos).

Tabla 6-6. Parámetros de ajuste y R^2 de las curvas maestras de las mezclas con caucho fabricadas por Compactación Giratoria.

Mét. de Compactación	Mezcla	δ (Log E * min)	β	γ	R^2
Giratoria	3,2EM_0,00CR	0,5030	-0,7629	-0,3534	0,9996
	3,2EM_0,25CR	0,4994	-0,7387	-0,3981	0,9997
	3,2EM_0,50CR	0,5223	-0,8441	-0,3103	0,9998
	3,2EM_0,75CR	0,5518	-1,0418	-0,3292	0,9993
	3,45EM_0,00CR	0,5377	-0,4877	-0,2883	0,9998
	3,45EM_0,25CR	0,5202	-1,0357	-0,3147	0,9731
	3,45EM_0,50CR	0,4813	-0,6224	-0,4033	0,9998
	3,45EM_0,75CR	0,5539	-1,3908	-0,5605	0,9998
Marshall	MC_5,6A	0,4982	-0,4830	-0,4483	0,9996



6.5.2.3. Curvas Maestras, mezclas con calamina

En la Fig 6-14 se muestran las curvas maestras de la mezcla control con 3,2% de emulsión además de las curvas para cada dosificación de calamina fabricadas empleando el compactador Marshall. Las curvas maestras planteadas presentan un buen ajuste por su valor de R^2 mayor a 0,9 como se muestra en la Tabla 6-7.

Se realizó un análisis similar al realizado en las mezclas con caucho. En comparación con la mezcla en caliente utilizada (5,6% de asfalto) se observa en la Fig 6-14 que en las curvas de las MRF hay una notoria rigidez, lo cual es representado por el valor del parámetro gamma (γ), es menor que la mezcla en caliente e incluso es menor que los de las mezclas con caucho. Indicando que la calamina rigidiza la mezcla, dando como resultado unas curvas visualmente más extendidas, por lo tanto, tienen una menor pendiente. La curva con mayor rigidez es la curva con mayor contenido de calamina (3%) y la de menor rigidez es la mezcla control. Además, se observa que para frecuencias reducidas bajas, la mezcla es más rígida que la mezcla en caliente sin embargo como se observa en la Fig 6-14 a frecuencias reducidas altas, la mezcla presenta menor rigidez que la MC.

Dados estos resultados se considera que este ensayo es suficiente para caracterizar el comportamiento de las mezclas con calamina y sólo se empleó compactación tipo Marshall para este grupo de especímenes.

Tabla 6-7. Parámetros de ajuste y R2 de las curvas maestras de las mezclas con calamina. Compactación Marshall

Mét. de Compactación	Mezcla	δ (Log E * min)	β	γ	R2
Marshall	3,2EM_1CA	0,4831	-0,5820	-0,2560	0,9886
	3,2EM_3CA	0,5242	-0,3163	-0,2311	0,9801
Marshall	MC_5,6A	0,4982	-0,4830	-0,4483	0,9996

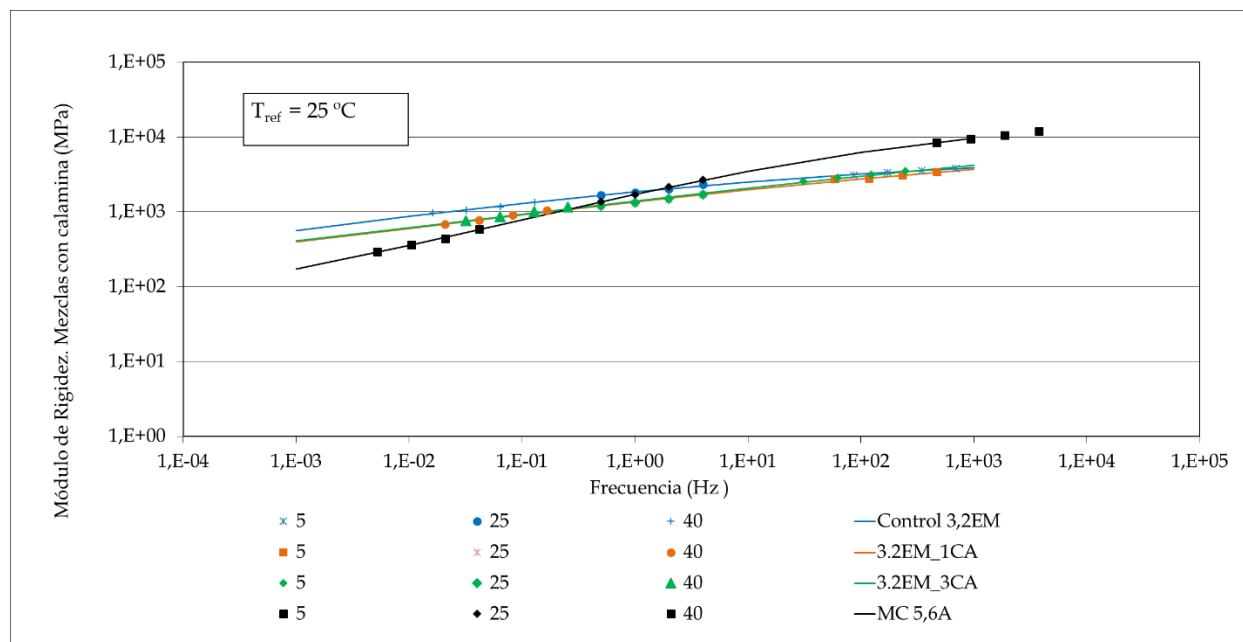


Fig 6-14. Curvas maestras con distintos porcentajes de calamina con 3,2% de emulsión, fabricados por compactación Marshall.

6.5.3. Resistencia a la deformación permanente: Creep de rigidez de rigidez

El ensayo de Creep, arroja los datos correspondientes a la deformación permanente acumulada al cabo de 3600 ciclos de carga. Este ensayo fue realizado a los especímenes con 3,2% y 3,45% de emulsión y las distintas dosificaciones de caucho: 0.25, 0.5 y 0.75%. Las pruebas se realizaron con una presión de acondicionamiento de 10 kPa durante 600 s de acuerdo la norma EN 12697-25 Método A-Uniaxial. Luego, se eliminó la tensión de acondicionamiento y se aplicó una tensión de 100 kPa para 1800 ciclos con carga de 1 segundo y 1 segundo de descanso y se midió la deformación axial durante la prueba de fluencia con dos deformímetros. Demás detalles de la configuración de la prueba se encuentran descritos en la sección 4.3.2. Es importante además destacar que los ensayos fueron realizados luego de finalizado el curado de 72h a 40°C y de finalizado un período de reposo de 40 días a 25°C, esto con el objeto de que todas las muestras tuvieran la misma edad de ensayo y condiciones de resistencia similares.

En la sección 10.7 se presentan las gráficas de deformación permanente (%) para cada tipo de mezcla, en la que se presenta en el eje *y* la deformación acumulada por cada ciclo de carga en el eje *x*. En estas gráficas se presentan los datos para las mezclas compactadas por Compactación Marshall versus la mezcla compactada en Giratorio. En estas gráficas se presentan el promedio con la desviación estándar de 3 especímenes ensayados. Se observa de manera general que para ambos casos la deformación permanente cuando se utiliza la compactación giratoria es menor que la de los especímenes compactados por el método Marshall. Esto puede deberse a que la compactación giratoria produce un efecto de densificación mayor tal como se demostró en la sección 6.2. Es importante destacar que todas las muestras fabricadas contienen 1% de cemento portland y este aditivo permite reducir la deformación permanente de las mezclas recicladas (Niazi and Jalili, 2009). Además, la compactación giratoria permite la consecución de vacíos contantes en la mezcla por el efecto de amasado lo que permite que la mezcla sea menos propensa a deformaciones permanentes (Lee, Yongjoo and Byunghee, 2009). Con base en esto, se puede afirmar que esta es una de las causas por las cuales la deformación permanente es menor, ya que se encontró como se muestra en la sección 6.4 que la compactación giratoria genera vacíos menores a los de las muestras compactadas por compactación Marshall.

En la Fig 6-15 se resumen los datos para todas las mezclas ensayadas. De manera transversal se tiene que a mayor contenido de emulsión la deformación permanente aumenta. Esto puede atribuirse a que un mayor contenido de emulsión aumenta el ahuellamiento por las condiciones del ensayo temperatura y condiciones de carga. Cabe destacar que los módulos de rigidez a esta temperatura (40°C), no presentan diferencias significativas con el incremento del contenido de emulsión para ambos tipos de compactación (ver secciones 6.5.1.1y 6.5.1.2). Por lo tanto, este incremento puede deberse al carácter viscoelástico del cemento asfáltico residual que se encuentra adherido al RAP.

En el grupo de especímenes compactados por el método estático (Marshall) para los dos contenidos de emulsión al incrementar el contenido de CR no se aprecian diferencias significativas entre las mezclas a excepción de la mezcla 3,2EM_0,5CR, es decir en este tipo de compactación el efecto del caucho es casi nulo. Por otro lado, para el método de compactación Giratoria, en el caso

de 3,2% de emulsión las deformaciones permanentes de las mezclas con caucho son mayores que la mezcla control sin embargo van disminuyendo al aumentar la proporción de caucho. En el caso de las mezclas con 3,45% de emulsión, igualmente se presenta que las deformaciones disminuyen con el incremento del contenido de caucho sin embargo al llegar al contenido de 0,75% de caucho la deformación deja de ser significativamente menor que la mezcla control. Los resultados obtenidos implican que existe una relación significativa entre la deformación y la recuperación elástica en las mezclas que contienen caucho y son compactadas por compactación Giratoria (Nejad *et al.*, 2012).

El método de compactación Giratoria permite una disminución de aproximadamente un 50% del valor de la deformación permanente. Esto se puede atribuir al proceso de elaboración de los especímenes, dado que genera una redistribución de las partículas debido a que presentan un porcentaje de vacíos menores en comparación con las muestras compactadas por el método Marshall. Lo anterior le confiere a la muestra una mayor resistencia a las deformaciones permanentes. Es por esto que el método de compactación giratorio con 180 giros ha sido utilizado en investigaciones recientes porque ayuda a garantizar que se logren las densidades con porcentajes el orden de 92.5% de la densidad máxima teórica Gmm (Thanaya, Zoorob and Forth, 2009; Gao, Ni, Ph, *et al.*, 2014; Bessa *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2016).

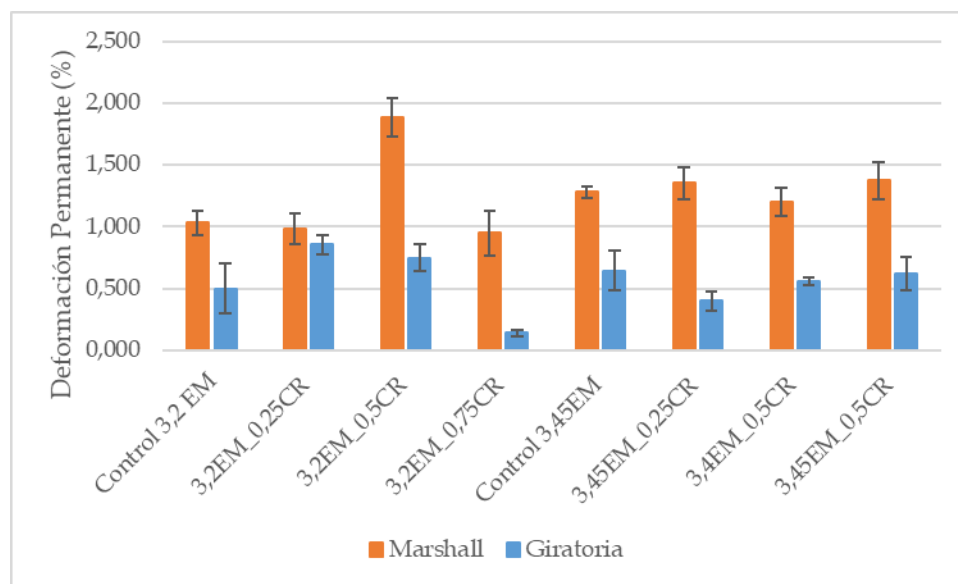


Fig 6-15. Deformación permanente acumulada para las mezclas fabricadas en compactación Marshall vs Compactación Giratoria a 40°C con un esfuerzo axial de 100kPa.

6.6. Resistencia a la tracción indirecta

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a tracción indirecta de los especímenes luego de un acondicionamiento en estado seco (ITS Seco) y húmedo (ITS húmedo). Estos dos tipos de acondicionamiento se encuentran descritos en la sección 4.4. De manera resumida el acondicionamiento en seco consiste en almacenar a temperatura controlada (25°C) los especímenes previamente a realizar la falla y el húmedo se logra con la saturación parcial de los especímenes de aproximadamente el 80% mediante la inmersión en agua durante 24h. La relación entre la resistencia húmeda y la seca, permite calcular la resistencia retenida TSR (%). Este ensayo ha sido utilizado mundialmente para caracterización de mezclas recicladas con emulsión (Malekzehtab, 2016). Valores mínimos de resistencia a la tracción indirecta se presentan en el estado del Arte en la sección 2.6.

Es importante reiterar que el TSR es de especial interés para las mezclas recicladas en frío debido a la preocupación que existe por la susceptibilidad a la humedad que presentan las mezclas recicladas en frío. Se ha demostrado que un curado adecuado para las condiciones planteadas en laboratorio y la adición de cemento puede reducir significativamente el potencial de daño por humedad en mezclas recicladas (Thanaya, 2003b; Lee, Yongjoo and Byunghee, 2009).

Los gráficos en esta sección están diseñados para facilitar las comparaciones entre los factores estudiados. La línea punteada de color negro representa la mínima resistencia retenida admisible (80%) (Wirtgen Group, 2012; Buss, 2015).

6.6.1. Resistencia a la tracción indirecta en mezclas con caucho – Compactación Marshall

La resistencia a la tracción indirecta del grupo de mezclas fabricadas por compactación Marshall se presenta en la

Fig 6-16 ~~Fig 6-16~~. Se observa que para 3,2% de emulsión sin caucho el TSR es 71% y para 3.45% es 83.3%, al adicionar el caucho los TSR fueron superiores a las de control y superiores a 80%. Adicionalmente, las barras muestran que 0,25% de caucho tiene un efecto casi nulo en la resistencia húmeda, pero si es notorio que la disminución de la resistencia seca con el incremento del porcentaje de caucho. Este incremento del ITS húmedo, favorece el TSR y por eso se observa el incremento del mismo. Esto significa que con el óptimo contenido de emulsión el incremento del caucho tiene un efecto favorable en la resistencia al daño por humedad, evidenciado en el incremento del TSR (%). Se puede afirmar que el caucho mejora la resistencia a la humedad para los especímenes fabricados por compactación Marshall.

Este residuo podría ser utilizado para proyectos con mezclas en frío en sitio, debido a que estas mezclas presentan una alta probabilidad de problemas de daño por humedad (Lee, Yongjoo and Byunghee, 2009). En el grupo de 3,45% de emulsión, se observa que la resistencia seca, no muestra una tendencia clara porque la resistencia baja, sube y baja cuando se el contenido de caucho es

0,75%. En 3,2% de emulsión el valor de 0,75% de caucho puede considerarse como un valor óptimo de caucho y en 3,45% de emulsión 0,5% de caucho. Los resultados pueden deberse a que el RAP es un material con una alta variabilidad, el método de compactación Marshall genera una mayor variabilidad en los vacíos del espécimen, de acuerdo a lo obtenido en la sección 6.4 (ver [Fig 6-9](#) Fig 6-9), por lo tanto, es difícil establecer con este método de compactación el efecto con relación a la presencia de caucho en las mezclas.

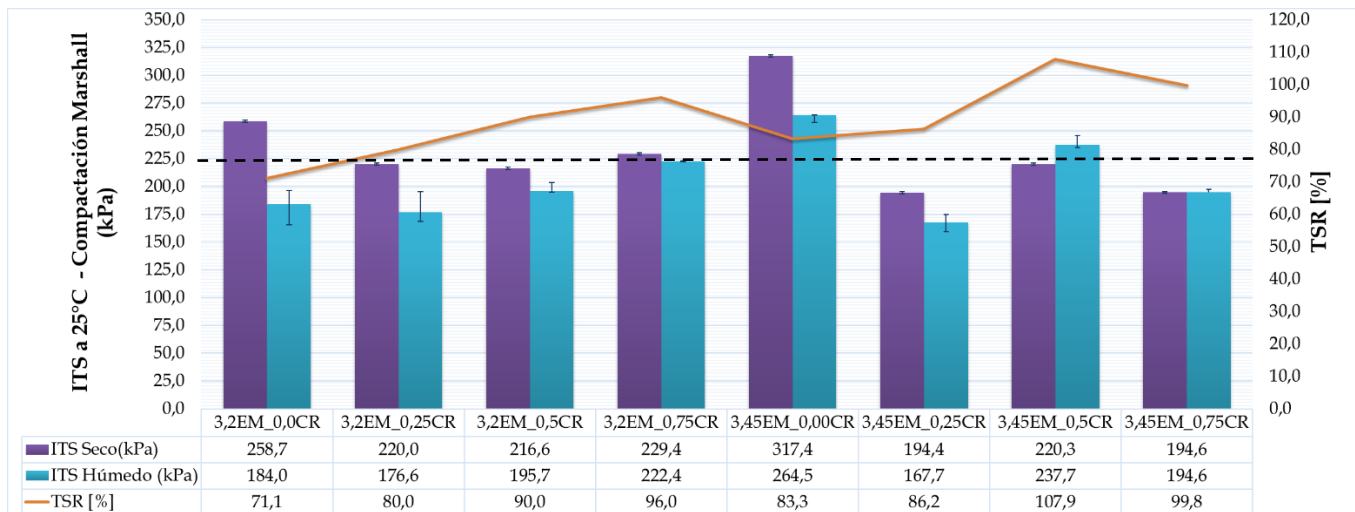


Fig 6-16. Resistencia a la tracción indirecta a 25°C en mezclas con caucho - Briquetas fabricadas por compactación Marshall

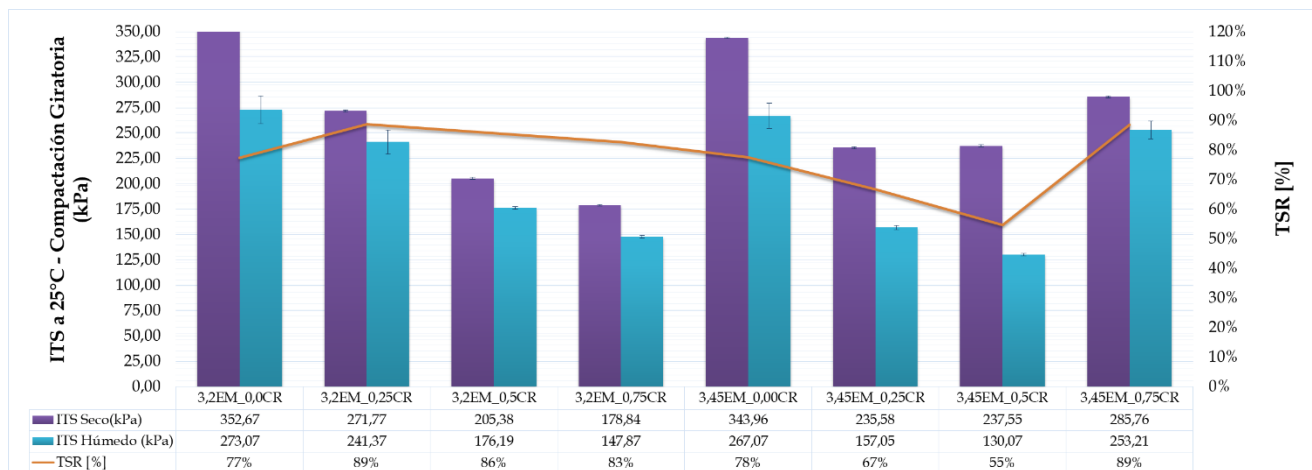
6.6.2. Resistencia a la tracción indirecta en mezclas con caucho- Compactación Giratoria

La resistencia a la tracción indirecta del grupo de mezclas fabricadas por compactación Giratoria se presenta en la Fig 6-17, en esta gráfica en general se observa que este método de compactación da resultados más repetibles, demostrado por la disminución de la dispersión de los datos. Las muestras compactadas en el compactador giratorio con 3,2% y 3,45 presentan valores de resistencia seca superiores a los de los compactados con el método Marshall. Sin embargo, los valores de resistencia húmeda son diferentes dependiendo del contenido de emulsión. Con 3,2% son superiores y los de 3,45 son inferiores. Por lo tanto, en las mezclas con 3,2% de emulsión los valores de TSR (%) son superiores al mínimo establecido de 80% sin embargo, en el grupo de 3,45 en las mezclas con 0,25 y 0,5% este valor es de 67% y 55%. La disminución del TSR puede atribuirse al incremento de la resistencia seca en las mezclas debido a la compactación Giratoria. Este incremento del ITS seco no favorece el TSR.

Para 3,2% de emulsión, a medida que se incrementa el contenido de caucho la resistencia seca disminuye y la resistencia húmeda también, pero el TSR (%) siempre fue a 80% y se mantuvo en un rango casi constante y superior al de la mezcla control. Para 3,45%, se observa que el TSR (%)

es mayor con el mayor contenido de caucho, pero la resistencia húmeda se disminuye en comparación con las mezclas compactadas por método Marshall.

A pesar de que la compactación giratoria le atribuye a los especímenes una mayor densidad comparada con la compactación estática (método Marshall), lo cual se demostró a través del incremento de la gravedad específica bulk G_{mb} (ver sección 6.2) y la disminución del contenido de vacíos (ver sección 6.4) ya que este método funciona mediante amasado (Cross *et al.*, 2010; Martínez-Echevarría *et al.*, 2012; Dondi *et al.*, 2014), parece ser influenciado además por el contenido de emulsión en la mezcla. Cabe destacar que los resultados pueden deberse a que el RAP es un material con una alta variabilidad, cuyas partículas están compuestas por agregado y asfalto residual con un nivel de envejecimiento.



6.6.3. Resistencia a la tracción indirecta en mezclas con calamina

La resistencia a la tracción indirecta del grupo de mezclas con calamina se encuentra presentada en la Fig 6-18. Estas mezclas fueron fabricadas mediante compactación Marshall. Los datos muestran la tendencia de disminución de la resistencia seca y un incremento de la resistencia húmeda con el incremento del porcentaje de calamina lo que conduce a un incremento del TSR (%). Este incremento puede deberse a que el asfalto nuevo puede verse oxidado u envejecido por el efecto del agua sobre las partículas de calamina (Kavussi and Qazizadeh, 2014).

Adicionalmente, la calamina incrementa la relación esfuerzo-deformación evidenciada en los resultados de módulo de rigidez en descritos en la sección 6.5.1.3, a medida que incrementa el contenido de calamina en el rango evaluado el módulo aumenta. Este incremento de la rigidez y de la resistencia a la tracción puede deberse a sus características de dureza, pulido y resistencia al desgaste (Sorlini, Sanzeni and Rondi, 2012; Skaf *et al.*, 2017).

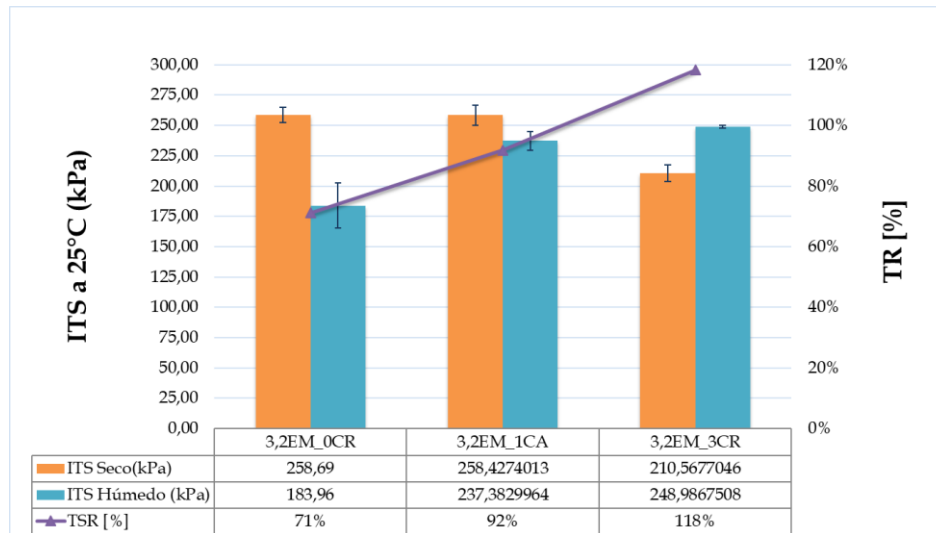


Fig 6-18. Resistencia a la tracción indirecta en mezclas con calamina - Briquetas fabricadas por compactación Marshall

7. LCA: Caso de Estudio

En este capítulo se muestra un análisis de los beneficios ambientales de las mezclas recicladas en frío con adición de caucho reciclado de llanta. Este análisis efectuó comparando el impacto ambiental que generan cuatro tipos de mezclas utilizadas para pavimentos flexibles, una mezcla asfáltica en caliente convencional MCD-19, una mezcla asfáltica abierta en frío con emulsión MAF-19, una mezcla asfáltica en frío compuesta por agregado reciclado proveniente del fresado de pavimento asfáltico PAR-19 y una mezcla asfáltica reciclada adicionada con caucho de llanta reciclado PAR-19+CR.

Para realizar esta comparación, se utilizó el software PaLate-v3.51 (Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects). Este ha sido utilizado para estimación del impacto ambiental a través de los ciclos de vida de los pavimentos teniendo en cuenta las materias primas y energía, consumo de agua, generación de residuos peligrosos y no peligrosos, descargas tóxicas y gases de efecto invernadero, así como emisiones de material particulado (Horvath, 2003; Santero, Masanet and Horvath, 2011a, 2011b).

En este aparte de la investigación, se estimaron los siguientes indicadores ambientales: energía consumida [MJ], agua consumida [Kg], CO_2 [Mg] o potencial de calentamiento global GWP durante la etapa constructiva y de mantenimiento de las alternativas propuestas, el mayor consumo de energía es para las mezclas en caliente, debido a las altas temperaturas requeridas para la mezcla y compactación. Para ambas alternativas en frío, el reciclaje, es la alternativa que menor potencial de calentamiento global GWP produce, requiere menor energía y menos agua, debido a que se elimina el proceso de explotación de material virgen además de que todo el proceso constructivo se realiza a temperatura ambiente.

7.1. Descripción del caso

El impacto ambiental de un pavimento puede estudiarse en todas las etapas desde extracción y producción de materiales, transporte, equipo in situ, demoras en el tráfico, carbonatación, iluminación, albedo e incluso en la resistencia al rodamiento del pavimento (Muench, Anderson and Bevan, 2010). Sin embargo, el estudio se enfoca en las etapas de construcción y mantenimiento las cuales constan de las siguientes partes: materia prima, equipos utilizados y transporte asociado a las actividades. Para calcular el impacto ambiental a través del uso del software PaLate-v3.51 puede cuantificarse con los siguientes indicadores (Horvath, 2003):

- Potencial de calentamiento global: consiste en estandarizar todos los gases de efecto invernadero: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxidos nitrosos (NO_x) y gases fluorados, a dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_{2\text{eq}}$).
- Material particulado: se refiere a la cantidad de material que se encuentra en los tamaños inferiores a 10 micrómetros. Pueden ser partículas sólidas o líquidas.
- Agua consumida.
- Energía consumida.
- CO producido: gas carbónico, que a niveles elevados puede causar la muerte.

- Hg: mercurio.
- Pb: plomo.

7.2. Metodología

Se estimó el impacto ambiental en términos de los indicadores: energía consumida [MJ], agua consumida [Kg], Co2 [Mg] o potencial de calentamiento global GWP. Para esto, se utilizaron cuatro escenarios, para el cual se eligió una sección de pavimento típica, para estandarizar los resultados. La sección típica se explica en adelante en la sección Unidad funcional.

7.2.1. Unidad funcional

La unidad funcional utilizada para este estudio es el Km de vía, en el cual se eligió una sección tipo, mostrada en la Fig. 12. Es utilizada en los escenarios 4 escenarios planteados: MDC-19, MAF-19, MRF-19 y PAR-19+CR. Esta carpeta de rodadura, se encuentra subyacida por una base granular de 12 pulgadas de espesor compuesta 70% por grava y 30% por arena y subbase granular con una relación 50-50 entre grava y arena. Acorde al Art. 320 y 330 respectivamente (INVIAS Instituto Nacional de Vías, 2013). El período de análisis utilizado es de 10 años. Para el que se define el mantenimiento como una sobrecarpeta asfáltica de mezcla en caliente de 5cm aplicada cada 4 años acorde con el artículo 450 de las especificaciones del artículo 450 de las especificaciones generales de construcción de carreteras (INVIAS, 2013a). Se establece una distancia promedio para los agregados y agua para mezclado de 31 millas y la distancia para el ligante asfáltico de 100 millas.

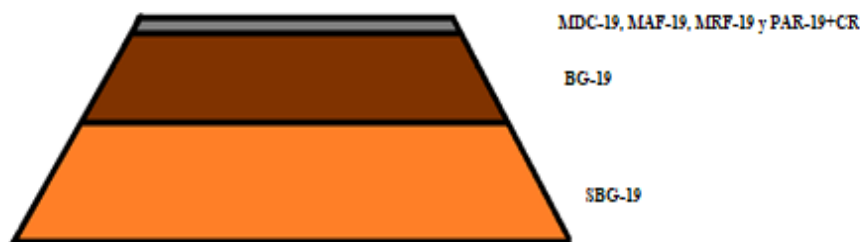


Fig 7-1. Esquema Unidad funcional.

Para cada uno de los escenarios se definieron las características de la mezcla, mostrados en la [Fig 7-1](#). Basándose en las recomendaciones de las especificaciones del Instituto Nacional de Vías. Para la mezcla densa en caliente, con base en el ART. 450, la mezcla densa en frío el ART. 440 (INVIAS, 2013b).

Tabla 7-1. Escenarios planteados.

Tipo de mezcla	MDC-19	MDF-19	PAR-19	PAR-19+CR
Espesor (cm)	10	10	10	10
Agregado virgen (%)	95	96.7	0	0
Asfalto o emulsión (%)	5	3.3	3.3	3.3
Caucho (%)	0	0	0	0,75

7.3. Resultados software PaLATE

Para cada una de las alternativas, se introducen las características de la unidad funcional y se ajusta a cada uno de los escenarios planteados. El total de los flujos entrantes y salientes del sistema, se observa en la Tabla 7-2.

Tabla 7-2. Resumen de indicadores para construcción inicial y mantenimiento.

Indicador TOTAL	MDC-19	MDF-19	PAR-19	PAR-19 + CR
Energía [MJ]	5.147.467,07	3.872.196,00	3.399.782,33	3.404.763,15
Agua consumida [kg]	1.096,25	631,50	558,77	558,89
CO ₂ [Mg] = GWP	313,79	247,35	214,78	216,51
NO _x [kg]	4.085,11	4.015,64	3.298,50	3.303,35
PM ₁₀ [kg]	2.999,71	2.874,71	2.427,67	2.428,00
SO ₂ [kg]	39.216,62	29.274,18	29.398,16	29.407,93
CO [kg]	838,90	594,42	511,82	512,30
Hg [g]	3,29	1,41	1,29	1,29
Pb [g]	200,72	110,04	98,14	98,40

7.4. Análisis Comparativo por tipo de las mezclas

A continuación, se observan en las figuras Fig 7-2, Fig 7-3 y Fig 7-4, los cuatro escenarios planteados los parámetros energía consumida, agua consumida y CO₂ , en MJ, kg y mg respectivamente.

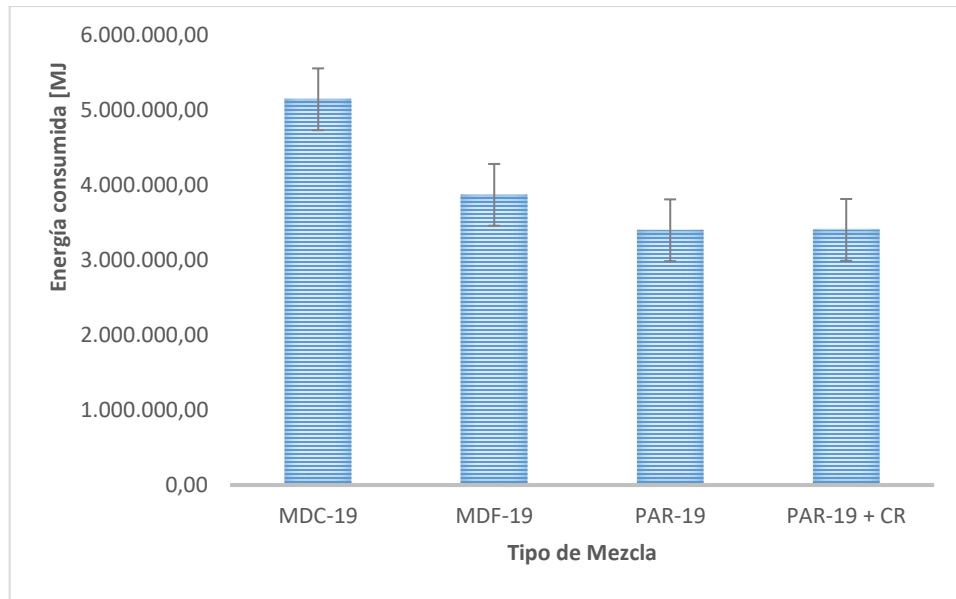


Fig 7-2. Indicador energía consumida por tipo de mezcla.

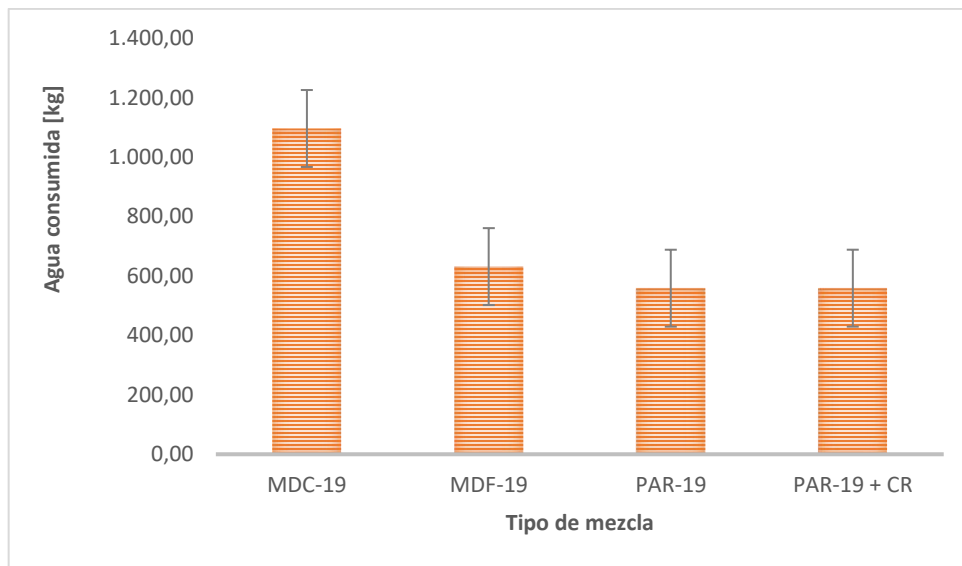


Fig 7-3. Indicador agua consumida por tipo de mezcla.

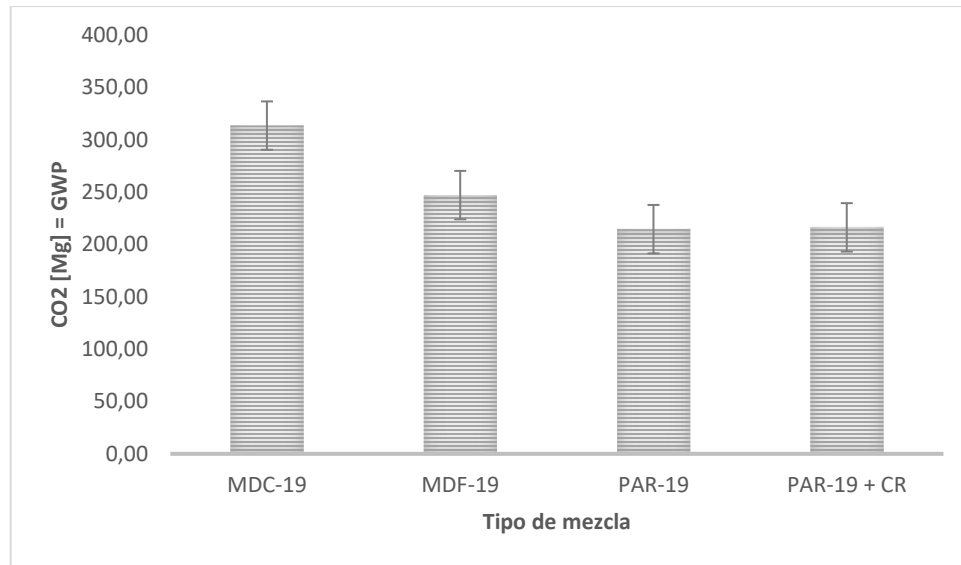


Fig 7-4. Indicador CO2 por tipo de mezcla

Para observar detalladamente, cómo es el comportamiento de los indicadores, en la etapa constructiva y de mantenimiento, se muestran a continuación, los resultados de este análisis, en las Fig 7-5, Fig 7-6 y Fig 7-7.

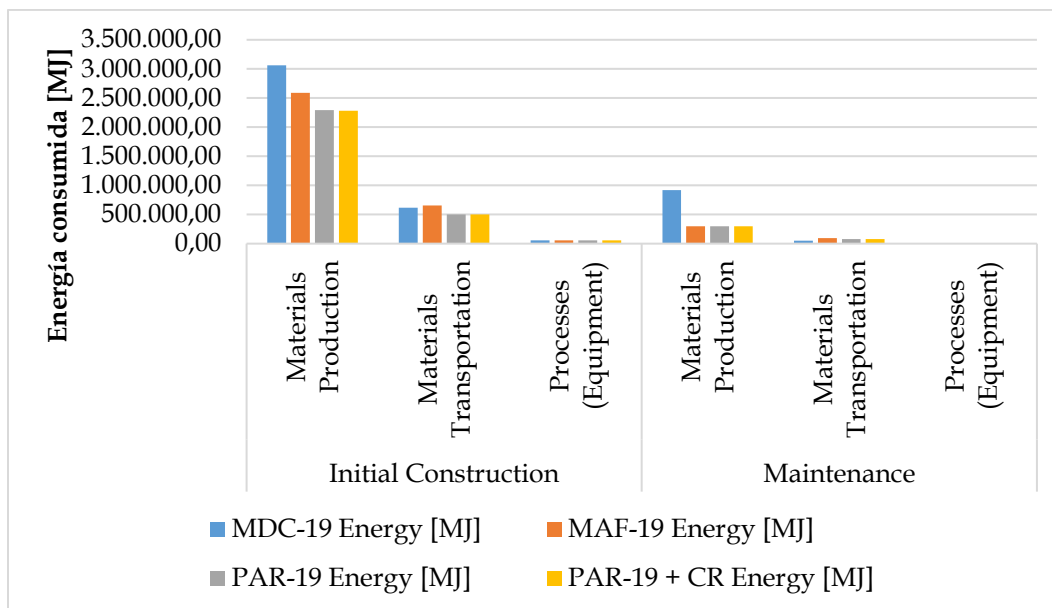


Fig 7-5. Energía consumida por etapa de construcción inicial y mantenimiento por tipo de mezcla [MJ].

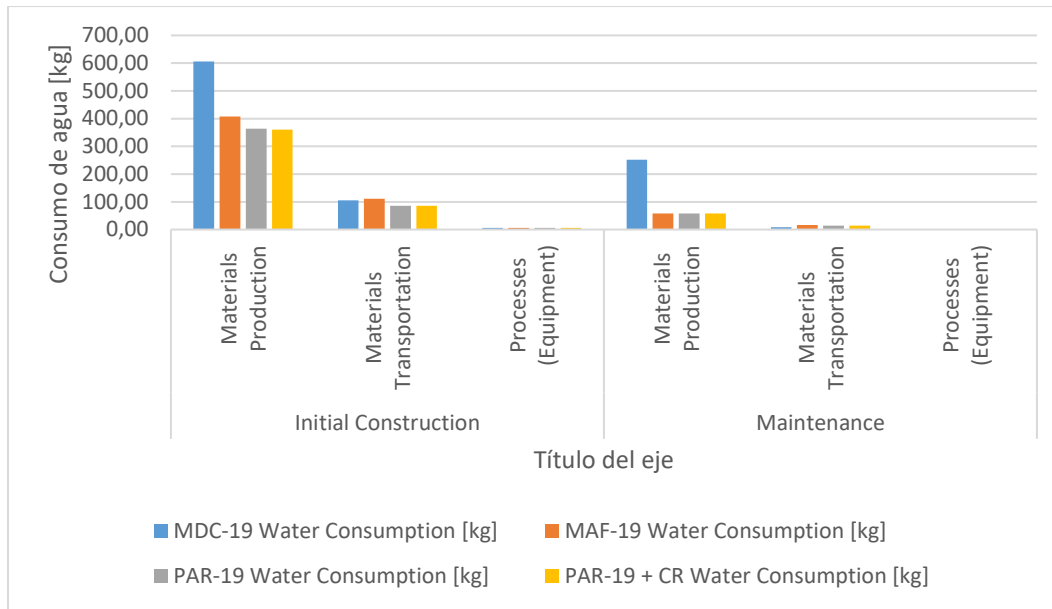


Fig 7-6. Consumo de agua por etapa de construcción inicial y mantenimiento por tipo de mezcla [kg].

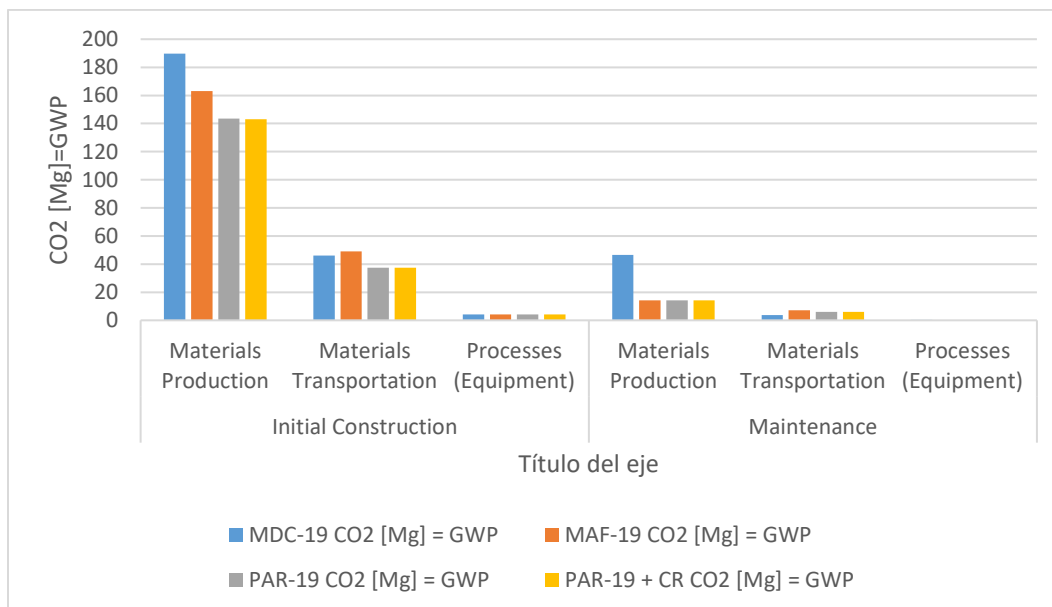


Fig 7-7. CO2 por etapa de construcción inicial y mantenimiento por tipo de mezcla[Mg].

8. Conclusiones y recomendaciones para investigaciones futuras

El presente trabajo de tesis se llevó a cabo con el objeto de estudiar la influencia de la inclusión del grano de caucho reciclado y la calamina (escoria de acero) en el diseño de mezclas recicladas en frío con emulsión. Para lo anterior, se analizaron diferentes fuentes disponibles en el estado del conocimiento con observancia particular en la especificación de INVIAS CAPÍTULO 4 ART. 461 y el Manual de Reciclaje en frío de Wirtgen 2004 y 2012. Se calculó la demanda teórica de asfalto residual por superficie específica y de manera experimental a través de ensayos de compactación modificado, módulo de rigidez, resistencia a tracción indirecta y propiedades volumétricas se optimizó el contenido de fluidos (agua y emulsión). Este diseño se realizó empleando RAP como única fuente de agregado y se escogió el 3,2% de emulsión y 1% de cemento como la mezcla óptima. Como criterios para la selección de tal contenido se consideró el mínimo contenido de emulsión que presenta resultados aceptables en términos de módulo de rigidez permanente y propiedades volumétricas. Sin embargo, se escogió además una segunda mezcla para estudio con 3,45% de emulsión basados en los resultados de microscopía SEM, en el que se observó que por la forma de los residuos (caucho ó calamina) pueden generarse mayores requerimientos de ligante debido a su forma granular (el caucho) y su forma angulosa (la calamina).

Se fabricaron especímenes de acuerdo al diseño de mezcla propuesto, empleando porcentajes de reemplazo de caucho: 0,25%, 0,5% y 0,75% utilizando dos contenidos de emulsión (3.2% y 3.45%) y de calamina de 1 y 3%, en el caso de la calamina sólo se trabajó con 3,2% de emulsión. Las mezclas con caucho se prepararon empleando dos tipos de compactación: Marshall y Giratoria para evaluar el efecto del proceso de fabricación en el comportamiento de las mezclas. Luego se caracterizaron a través de los siguientes ensayos: módulo de rigidez y resistencia a la deformación permanente a través de la modalidad de ensayo Creep Uniaxial y resistencia a la tracción indirecta en condición seca y húmeda.

De la investigación se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Caucho de llanta:

Los parámetros de Gmm, Gmb y Gravedad específica aparente disminuyen con el incremento del caucho, esto se puede atribuir a que es un material con una densidad inferior a la del RAP por lo tanto al realizar un reemplazo en masa se produce un efecto de aligeramiento en las mezclas.

Las mezclas compactadas por compactación Marshall tienen un contenido de vacíos cercano al 13%, el cual está entre 9 y 14% parámetros mínimo y máximo definidos por varias metodologías para mezclas en frío como: Marshall modificado (método A), Hveem (método B), Oregon (método C), y California (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2013). Sin embargo, se puede observar que en el caso del caucho tienen un contenido de vacíos en algunos casos superiores a los de las mezclas con calamina debido a que la gradación de la calamina es más fina: 60% pasa el tamiz de 0,425mm en comparación con 0,54% en la gradación del CR.

En relación a las mezclas con caucho, compactadas por compactación giratoria, tuvieron una disminución en el contenido de vacíos hasta un 10%, esto se puede atribuir al efecto de

|

organización de las partículas en un paquete más denso por el amasado durante la compactación que permite a obtención de vacíos menores además de tener una mayor lubricación por el incremento en la emulsión.

De los resultados de módulo de rigidez, con los métodos de compactación utilizados se encuentra que la inclusión de caucho genera una disminución de este parámetro para las diferentes dosificaciones empleadas en las mezclas. Esta disminución es más alta en las mezclas con mayor emulsión (3.45%). Esto puede atribuirse a que un mayor contenido de emulsión debido al incremento de la humedad genera una disminución de la cohesión final.

El módulo de rigidez en las mezclas con adición de caucho al utilizar la compactación con el martillo Marshall casi siempre disminuye con la adición de caucho a todas las temperaturas. Estas variaciones son superiores en las mezclas con 3.45% con respecto a la mezcla control. Con 3.2% de emulsión a 5°C y 0.5Hz con 0.25% de caucho disminuye 19% y con 0.75%, 36%. Con 3.45% la disminución es mayor con un valor de 44% para la mezcla con 0.75% de caucho, es decir el módulo se reduce de 3556 MPa a 1991 MPa bajo la misma frecuencia. A 25°C y 0.5Hz la tendencia es similar puesto que con el incremento del contenido de caucho la disminución del módulo se hace mayor. En el caso de 40°C y 0,5Hz la mezcla con 0.25% de caucho presenta una disminución de aproximadamente 33% con respecto a la mezcla control, pero la diferencia entre las mezclas con caucho (0.25, 0.5 y 0.75) no supera el 7%, y se mantiene en el orden de $680,9 \pm 29,12$ MPa. Esto puede ser causado debido a las mezclas tratadas con emulsión poseen menor cantidad de asfalto que una mezcla en caliente (5%) versus 2% de asfalto residual más la humedad que le aporta la emulsión. Esta característica puede generar que la mezcla no dependa únicamente de las características viscoelásticas, sino que se comporta también como un material de carácter granular.

Con relación al módulo de rigidez en las mezclas con adición de caucho al utilizar la compactación giratoria a menor temperatura (5°C) la disminución del módulo con la adición de caucho es mayor en comparación con la temperatura de 40°C. Por ejemplo, a 5Hz, con la adición de 0.25% de caucho, el módulo disminuye un 45%, sin embargo, bajo estas mismas condiciones a 40°C se disminuye solo el 19%.

Teniendo en cuenta que es un proceso en frío y el caucho es añadido en seco, no se produce un fenómeno de digestión ya que el caucho actúa como parte de los agregados no como modificador del ligante. Se recomienda para futuras investigaciones, probar maneras de modificar la emulsión con el caucho y lograr que trabajen de manera monolítica. Otra alternativa sería probar que en el proceso de fabricación la mezcla, se mezclen la emulsión y el caucho previamente y luego se adicione este "ligante nuevo" a la mezcla, para evaluar el efecto de este cambio en el orden de la adición de los componentes.

Las curvas maestras del módulo de rigidez, en las mezclas compactadas con el martillo Marshall muestran que el caucho disminuye la rigidez de la mezcla a baja temperatura. Es decir se comporta menos rígida a alta frecuencia, tal como lo encuentra Dondi en 2014 (Dondi *et al.*, 2014). Se observa además que a frecuencias bajas para ambos contenidos de emulsión al incrementar el contenido de caucho, se disminuye el módulo lo cual puede ser beneficioso para evitar problemas de fisuración por congelamiento (Wirtgen, 2004). Basándonos en los resultados de la

|

compactación Giratoria, se encuentra que el método de compactación influye en el comportamiento viscoelástico de las mezclas dándoles una forma más parecida a la de una curva maestra de mezcla en caliente. Similar a lo que ocurre con las mezclas por compactación Marshall, para frecuencias bajas, el módulo es mayor que el de la mezcla en caliente pero para altas frecuencias, el módulo de rigidez de las MRF es más bajo que el de la MC, parecido a lo observado en mezclas recicladas con emulsión asfáltica por (Pérez, Medina and del Val, 2013).

De los resultados del ensayo de Creep Uniaxial, se pudo observar que a mayor contenido de emulsión la deformación permanente aumenta. La deformación total acumulada en las briquetas disminuye con el incremento del contenido de caucho para las briquetas con 3,2% de emulsión, esto se puede atribuir a que el caucho hace las veces de un “agregado elástico” el cual puede absorber parte de las deformaciones. El caucho utilizado en esta investigación, posee un tamaño de 0.425mm y una forma granular debido al proceso de fabricación del mismo, el cual fue por trituración a temperatura ambiente. Este proceso de fabricación genera una textura granular comparado con el método de trituración criogénica que genera una textura suave (Pettinari *et al.*, 2014)(ver resultados de ensayo de microscopía de barrido sem, ver sección 3.3).

Con relación al ensayo de tracción indirecta, para las mezclas fabricadas por compactación Marshall, se observó que el caucho tiene un efecto favorable en la resistencia al daño por humedad, evidenciado en el incremento del TSR (%), el cual pasa de 71% en la mezcla control a 96% al añadir 0,75% de caucho con 3,2% de emulsión y de 83,3% a 99,8% en la mezcla con 3,45% de emulsión.

En el caso de los especímenes fabricados por el método de compactación giratoria, las muestras compactadas con 3,2% y 3,45 presentan valores de resistencia a la tracción indirecta seca superiores a los de los compactados con el método Marshall. Sin embargo, los valores de resistencia húmeda son diferentes dependiendo del contenido de emulsión. Con 3,2% son superiores a 80% mientras que los de 3,45 son inferiores. Por lo tanto, en las mezclas con 3,2% de emulsión los valores de TSR (%) son superiores al mínimo establecido de 80% sin embargo, en el grupo de 3,45 en las mezclas con 0,25 y 0,5% este valor es de 67% y 55%. La disminución del TSR puede atribuirse falta de adherencia entre las partículas de agregado y el asfalto.

El porcentaje de caucho que se puede considerar como óptimo es 0,25% dado que es el menor porcentaje que menor disminución en el módulo produce, da un valor de TSR (%) más alto, el cual es un parámetro utilizado para medir la resistencia al daño por humedad, presenta la deformación permanente acumulada menor y en las curvas maestras se observa un mejor comportamiento tanto a bajas frecuencias de carga como a altas en comparación con una mezcla en caliente convencional.

- Calamina:

Las características volumétricas: Gmm, Gmb y Gravedad específica aparente aumentan con el incremento de la calamina, esto se puede atribuir a que es un material pesado proveniente de la corrosión de aceros cuya densidad es superior a la del RAP y por su granulometría bastante fina (60% pasa el tamiz de 0.425mm), por esta razón, al realizar un reemplazo en masa se produce un efecto de densificación en las mezclas.

|

El módulo de rigidez evaluado a las 3 temperaturas: 5, 25 y 40°C y a cuatro frecuencias 0.5, 1 2 y 4 Hz disminuyen con el incremento de calamina al igual que disminuye con la disminución de la frecuencia de carga y el aumento de la temperatura. Sin embargo, cabe destacar que los resultados presentan una dispersión menor que la presentada en las mezclas con caucho y que los módulos con 3% de calamina tienen un valor mayor que los de 1% de calamina. Basados en esto y en el análisis de varianza, se requiere de mayor análisis del parámetro a distintas condiciones de frecuencia y temperatura, porque los resultados indican que tanto la variable temperatura como calamina no son significativas.

Se realizó un análisis similar al realizado en las mezclas con caucho, se comparó las curvas maestras de la mezcla en frío con calamina con una mezcla en caliente convencional (MC). En comparación con la MC (5,6% de asfalto) se observa que en las curvas de las MRF hay una notoria rigidez, lo cual es representado por el valor del parámetro γ , es menor que la mezcla en caliente e incluso es menor que los de las mezclas con caucho. Indicando que la calamina rigidiza la mezcla, dando como resultado unas curvas visualmente más extendidas (tienen una pendiente menor). La curva con mayor rigidez es la curva con mayor contenido de calamina (3%) y la de menor rigidez es la mezcla control. Además, se observa que para frecuencias bajas, la mezcla es más rígida que la mezcla en caliente sin embargo como se observa en la Fig 6-14 a frecuencias altas, la mezcla presenta menor rigidez que la MC.

En relación a la resistencia a la tracción indirecta, en el caso de la resistencia seca, con la adición de 1% de calamina se mantiene la resistencia, sin embargo, al añadir 3% de calamina la resistencia disminuye 19% con respecto a la mezcla control. En cuanto a la resistencia húmeda, se ve incrementada en 29% con la adición de 1% de calamina y 35% con la adición de 3% de calamina. Este efecto es atribuido a que el asfalto nuevo puede verse oxidado u envejecido por el efecto del agua sobre las partículas de calamina (Kavussi and Qazizadeh, 2014). Sin embargo, se debe observar con precaución el posible efecto de oxidación que pueda generar la calamina en el cemento asfáltico. Se recomienda para futuras investigaciones involucrar pruebas que puedan identificar el efecto de envejecimiento en el cemento asfáltico por efecto de la calamina.

Las conclusiones presentadas se enmarcan dentro de un número limitado de muestras y para los materiales utilizados para la investigación. Los resultados indican que el uso de subproductos de la industria (calamina) y otros desechos (llantas) son viables en la elaboración de mezclas asfálticas en frío en Colombia dado el comportamiento satisfactorio observado con relación a las propiedades de rigidez, deformación permanente medida en el ensayo de Creep Uniaxial y resistencia a la tracción indirecta, ofreciendo una alternativa en proyectos de infraestructura sostenible. Sin embargo, el porcentaje de adición dependerá de la disponibilidad de estos materiales en las fuentes considerando los porcentajes de reemplazo evaluados en este estudio.

El uso del RAP en pavimentación es entonces una alternativa para la construcción de infraestructura vial sostenible debido a la disminución del potencial de calentamiento global, la energía consumida y el agua consumida, durante los procesos de construcción y mantenimiento, con respecto a las alternativas convencionales utilizadas (mezcla densa en caliente). Luego de la simulación con la hoja de cálculo PaLate, se observó que para todas las alternativas MDC-19, MDF-19, PAR-19 y PAR-19+CR (con 0.75% de CR), se demuestra que la mayor cantidad de energía consumida se genera en la extracción de los materiales, lo que conduce a que las alternativas PAR-19 y PAR-19+CR sean las alternativas con mejor impacto ambiental. Adicionalmente, es

importante resaltar que la inclusión de caucho en una proporción de 0.75% en la mezcla no generó una diferencia significativa con respecto a la mezcla reciclada, en cuanto a los indicadores medidos.

Se recomienda para futuras investigaciones:

Continuar con ensayos de fatiga, deformación permanente con rueda cargada que puedan complementar los resultados presentados en la presente tesis.

Realizar un tramo de prueba para evaluar su factibilidad con materiales locales y caracterizar las mezclas bajo condiciones de tráfico y condiciones ambientales reales.

Luego de analizar los resultados obtenidos en un tramo de prueba, evaluar a través de ensayos el rendimiento a largo plazo de las mezclas y con muestras extraídas in situ.

9. Bibliografía

AEMA (2008) 'Basic Asphalt Emulsion Manual-Fourth Edition.PDF'.

Ahmedzade, P. and Sengoz, B. (2009) 'Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete', *Journal of Hazardous Materials*, 165(1-3), pp. 300-305. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.09.105.

ALCALDIA MAYOR DE BOGOTA D.C., I. D. D. U. and UNIVERSIDAD DE LOS ANDES (2005) 'Segunda Fase Del Estudio De Las Mejoras Mecánicas De Mezclas Asfálticas Con Desechos De Llantas - Pista De Prueba.', p. 234. Available at: https://www.idu.gov.co/documents/20181/362981/mejoras_mecanicas_mezclas_asfalticas_de_sechos_llantas_segunda.pdf/4fceb51b-6243-472f-8797-ff56af269924.

Alkins, A., Lane, B. and Kazmierowski, T. (2008) 'Sustainable Pavements: Environmental, Economic, and Social Benefits of In Situ Pavement Recycling', *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2084, pp. 100-103. doi: 10.3141/2084-11.

Ameri, M. and Behnood, A. (2012) 'Laboratory studies to investigate the properties of CIR mixes containing steel slag as a substitute for virgin aggregates', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 26(1), pp. 475-480. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.047.

Arimilli, S., Jain, P. K. and Nagabhushana, M. N. (2016) 'Optimization of Recycled Asphalt Pavement in Cold Emulsified Mixtures by Mechanistic Characterization', *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2), pp. 1-10. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001412.

Asphalt Academy (2009) *TG2-A guideline for the Design and construction of Bitumen Stabilised Materials*.

Asphalt Recycling and Reclaiming Association (2013) 'Basic Asphalt Recycling Manual', *Federal Highway Administration*, 53(9), pp. 1689-1699. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Babagoli, R., Ameli, A. and Shahriari, H. (2016) 'Laboratory evaluation of rutting performance of cold recycling asphalt mixtures containing SBS modified asphalt emulsion', *Petroleum Science and Technology*. Taylor & Francis, 34(4), pp. 309-313. doi: 10.1080/10916466.2015.1135168.

- Batista, F. *et al.* (2012) 'Building Blocks for a Best Practice Guide on Cold in-Place', pp. 13–15.
- Behiry, A. E. A. E. M. (2013) 'Evaluation of steel slag and crushed limestone mixtures as subbase material in flexible pavement', *Ain Shams Engineering Journal*, 4(1), pp. 43–53. doi: 10.1016/j.asej.2012.07.006.
- Bessa, I. S. *et al.* (2016) 'Design of cold recycled mixes with asphalt emulsion and portland cement', *Canadian Journal of Civil Engineering*, 43(9), pp. 1–39. doi: 10.1139/cjce-2016-0111.
- Bocci, M. *et al.* (2011) 'A study on the mechanical behaviour of cement-bitumen treated materials', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 25(2), pp. 773–778. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.07.007.
- Botasso, H. G. *et al.* (2008) 'Reciclado de pavimentos asfálticos en frío. Una forma de utilizar totalmente el RAP para el mantenimiento y rehabilitación de la red caminera', *6º Encuentro Proyecto Integrador PROCQMA*, (1), p. 16. Available at: http://lemac.frlp.utn.edu.ar/?page_id=440.
- Brovelli, C. and Crispino, M. (2012) 'Investigation into cold recycled materials: Influence of rejuvenant, mix design procedure and effects of temperature on compaction', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 37, pp. 507–511. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.070.
- Buczyński, P. and Iwański, M. (2017) 'Fatigue Life Comparison of Recycled Cold Mixes with Foamed Bitumen and with Bitumen Emulsion', *Procedia Engineering*. The Author(s), 172, pp. 135–142. doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.035.
- Burbano Carvajal, J. P. and Zuluaga Astudillo, D. A. (2011) 'Influencia de la Granulometría en el Desempeño del Fresado Estabilizado con Emulsión Asfáltica'.
- Buss, A. F. (2015) 'Investigation of sustainable pavement technologies evaluating warm mix asphalt using recycled asphalt materials Digital Repository @ Iowa State University Investigation of sustainable pavement technologies evaluating warm mix asphalt using recycled asphalt', (July).
- Calvi, P. (2015) 'Additivazione di miscele stradali riciclate per il miglioramento delle prestazioni in esercizio'.
- Cao, W. (2007a) 'Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process', 21, pp. 1011–1015. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.02.004.
- Cao, W. (2007b) 'Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process', *Construction and Building Materials*, 21(5), pp. 1011–1015. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.02.004.
- Cardone, F. *et al.* (2015) 'Curing and temperature sensitivity of cement-bitumen treated materials', *International Journal of Pavement Engineering*, 16(10), pp. 868–880. doi: 10.1080/10298436.2014.966710.
- Castro, A., Martinez, G. and Fuentes, L. (2016) 'Efecto de la adición del polvo de llantas desechadas en mezclas asfálticas en frío con el 100 % de agregados reciclados', (November).
- CEDEX (2015) 'Reciclado De Pavmientos Asfálticos', pp. 1–21. Available at: http://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es_RECICLADODEPAVIMENTOSASFALTICO

|

SNOV2015.pdf.

CMNUCC (2015) 'Acuerdo de París', *Cop21*, 21930, p. 18. Available at: http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/l09s.pdf%5Cnhttps://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish_.pdf.

Consol (2016) 'INFORME TÉCNICO DE REPARACIONES DE PAVIMENTO EN EL HITO 46N PR86+820 - PR97+000'.

Cross, S. A. *et al.* (2010) 'Cold-in-place recycling in new york state', (6764).

Diefenderfer, Brian K; Apeagye, A. K. (2014) *I-81 IN-PLACE PAVEMENT RECYCLING PROJECT*.

Dondi, G. *et al.* (2014) 'Crumb Rubber in cold recycled bituminous mixes: Comparison between Traditional Crumb Rubber and Cryogenic Crumb Rubber', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 68, pp. 370–375. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.093.

Du, S. (2014) 'Interaction mechanism of cement and asphalt emulsion in asphalt emulsion mixtures', *Materials and structures*, pp. 1149–1159.

Ferrasa (2015) 'FICHA TÉCNICA SUBPRODUCTO CALAMINA'.

Gao, L., Ni, F., Charmot, S., *et al.* (2014) 'High-temperature performance of multilayer pavement with cold in-place recycling mixtures', *Road Materials and Pavement Design*, 15(4), pp. 804–819. doi: 10.1080/14680629.2014.924427.

Gao, L., Ni, F., Ph, D., *et al.* (2014) 'Influence on Compaction of Cold Recycled Mixes with Emulsions Using the Superpave Gyrotory Compaction', 26(11), pp. 1–8. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000987.

Giani, M. I. *et al.* (2015) 'Resources , Conservation and Recycling Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt , warm mix technology and cold in-place recycling', *Resources, Conservation & Recycling*, 104, pp. 224–238. doi: 10.1016/j.resconrec.2015.08.006.

Giuliani, F. and Rastelli, S. (2004) 'AN ANALYTICAL APPROACH TO EVALUATE THE PERFORMANCE OF COLD RECYCLED ASPHALT MIXTURES', (1), pp. 0–10.

González, D. O., Pachón, F. A. and Pulido, F. A. (2017) 'Análisis Mineralógico, Químico Y Porosimétrico De Agregados Pétreos Para Posterior Uso En Mezclas Asfálticas', p. 62.

Graziani, A. *et al.* (2016) 'Effect of curing on the physical and mechanical properties of cold-recycled bituminous mixtures', *Materials and Design*. Elsevier Ltd, 95, pp. 358–369. doi: 10.1016/j.matdes.2016.01.094.

Hassan, N. A. *et al.* (2014) 'A review of crumb rubber modification in dry mixed rubberised asphalt mixtures', *Jurnal Teknologi*, 70(4), pp. 127–134. doi: 10.1520/ACEM20120044.

Hodgkinson, A. and Visser, A. T. (2004) 'The role of fillers and cementitious binders when recycling with foamed bitumen or bitumen emulsion', *8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04)*, (September), p. CD-ROM.

Horvath, A. (2003) 'University of California Transportation University of California Life-Cycle

|

Environmental and Economic Assessment of Using Recycled Materials for Asphalt Pavements
Technical Report (Last update : September 12 , 2003) Arpad Horvath Assistant Professor De',
pp. 1-29.

Hui, Yao; Liang, Li; Hu, X. H.-C. and Yang, D. and X.-L. (2011) 'Gradation and performance
research of cold recycled mixture', *Geotechnical Special Publication No. 213* © ASCE.

Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá IDU (2011) *RECICLAJE DE PAVIMENTO ASFÁLTICO
EN EL SITIO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA*. Bogotá. doi:
<https://www.idu.gov.co/web/content/7614/450-11.pdf>.

INVIAS (2013a) 'Artículo 400- Especificaciones generales de construcción de carreteras', p. 440.
doi: Book.

INVIAS (2013b) 'RECICLADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO EN EL LUGAR
EMPLEANDO LIGANTES BITUMINOSOS'.

Jenkins, K. J. and Collings, D. C. (2016) 'Mix design of bitumen-stabilised materials – South
Africa and abroad', *Road Materials and Pavement Design*, 629(October), pp. 1-19. doi:
10.1080/14680629.2016.1213511.

Jiang, T. *et al.* (2011) 'Technology of emulsified asphalt cold recycling upper base used in
expressway asphalt pavement heavy maintenance', *Proceedings - 3rd International Conference on
Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA 2011*, 3, pp. 632-635. doi:
10.1109/ICMTMA.2011.729.

Karlsson, R. and Isacsson, U. (2006) 'Material-Related Aspects of Asphalt Recycling – State-of-
the-Art', *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(February), pp. 81-92. doi:
10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:1(81).

Kavussi, A. and Qazizadeh, M. J. (2014) 'Fatigue characterization of asphalt mixes containing
electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging', *Construction and Building
Materials*. Elsevier Ltd, 72, pp. 158-166. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.052.

Kim, Y. *et al.* (2009) 'Dynamic Modulus and Repeated Load Tests of Cold In-Place Recycling
Mixtures Using Foamed Asphalt', 21(June), pp. 279-285.

Kim, Y. *et al.* (2011) 'Impacts of Curing Time and Moisture Content on Engineering Properties of
Cold In-Place Recycling Mixtures Using Foamed or Emulsified Asphalt', (May), pp. 542-553.
doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000209.

Lee, H., Yongjoo, K. and Byunghye, H. (2009) *CIR-EMULSION AND ITS COMPARISON
AGAINST CIR-FOAM TEST RESULTS FROM*.

Lee, K. W. *et al.* (2016) 'Rational Mix-Design Procedure for Cold In-Place Recycling Asphalt
Mixtures and Performance Prediction', *American Society of Civil Engineers*, pp. 1-7. doi:
10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001492.

Lee, K. W., Brayton, T. E. and Harrington, J. (2002) 'New Mix-Design Procedure of Cold In-Place
Recycling for Pavement Rehabilitation'.

Lee, K. W., Brayton, T. E. and Huston, M. (2002) 'Development of performance bases mix design
for CIR of Bituminous Pavements Based on Fundamental Properties'.

|

Lee, S., Akisetty, C. K. and Amirkhanian, S. N. (2008) 'The effect of crumb rubber modifier (CRM) on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements', 22, pp. 1368–1376. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.04.010.

Lee, S. J., Akisetty, C. K. and Amirkhanian, S. N. (2008) 'The effect of crumb rubber modifier (CRM) on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements', *Construction and Building Materials*, 22(7), pp. 1368–1376. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.04.010.

Lin, J. *et al.* (2015) 'Research on development mechanism of early-stage strength for cold recycled asphalt mixture using emulsion asphalt', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 99, pp. 137–142. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.09.019.

Lyubarskaya, M. A. *et al.* (2017) 'Integrated Approach to Using Technology of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)', *Procedia Engineering*. The Author(s), 189(May), pp. 860–866. doi: 10.1016/j.proeng.2017.05.134.

Malekzehtab, H. (2016) 'Characterisation of Asphalt Mixes with Recycled Asphalt Pavement', (October).

Mamlouk (1979) 'Characterization of Cold Mixed Asphalt Emulsion Treated Bases', *Joint Highway Research Project*.

Mamlouk, M. S. and Zaniewski, J. P. (2009) *Materials for Civil and Construction Engineers*, 4th Edition.

Martínez-Echevarría, M. J. *et al.* (2012) 'In-laboratory compaction procedure for cold recycled mixes with bituminous emulsions', *Construction and Building Materials*, 36, pp. 918–924. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.040.

Martínez, A. and Miró, R. (2007) 'Microsoft Word - Spanish experience with the application of gyratory compactor and indirect tensile test in design and control o', 3120.

Maurer, G., Bemanian, S. and Polish, P. (2007) 'Alternative Strategies for Rehabilitation of Low-Volume Roads in Nevada', *Transportation Research Record*, 1989(1), pp. 309–320. doi: 10.3141/1989-78.

McDaniel, Rebecca S. Soleymani, H. *et al.* (2000) 'Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design'.

Méndez, A. (2015) 'Evaluación Técnica y Económica del uso de Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP) en Vías Colombianas', *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, p. 19.

Mercado, R., Bracho, C. and Avendaño, J. (2008) 'Emulsiones Asfálticas USOS-ROMPIMIENTO'.

Ministerio de Ambiente, V. y D. T. (2010) 'Resolución 1457 29 Julio 2010, Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestion Ambiental de Llantas Usadas y se adoptan otras disposiciones', p. 9.

Modarres, A. and Ayar, P. (2016) 'Comparing the mechanical properties of cold recycled mixture containing coal waste additive and ordinary Portland cement', *International Journal of Pavement Engineering*. Taylor & Francis, 17(3), pp. 211–224. doi: 10.1080/10298436.2014.979821.

Moghadas, F. *et al.* (2012) 'Investigating the properties of crumb rubber modified bitumen using

classic and SHRP testing methods', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 26(1), pp. 481–489. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.048.

Muench, S. T., Anderson, J. and Bevan, T. (2010) 'Greenroads: A sustainability rating system for roadways', *International Journal of Pavement Research and Technology*, 3(5), pp. 270–279. doi: 10.1088/1748-9326/4/3/034011.

Naciones Unidas (2012) 'Rio+20 Conferencia de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo Sostenible.', *El futuro que queremos*, p. 16. Available at: http://www.un.org/es/sustainablefuture/pdf/spanish_riomas20.pdf.

National Cooperative Highway Research Program (2013) 'SYNTHESIS 435 Recycled Materials and Byproducts in Highway Applications – summary report volume 1', 5, pp. 1–94.

Nejad, F. M. *et al.* (2012) 'Investigating the properties of crumb rubber modified bitumen using classic and SHRP testing methods', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 26(1), pp. 481–489. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.048.

Niazi, Y. and Jalili, M. (2009) 'Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion', *Construction and Building Materials*, 23(3), pp. 1338–1343. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.07.020.

Ortiz, Anjhela; Tribilcock, A. (2014) 'PROPUESTA DE UN PLAN DE EMPRESA PARA EL DISEÑO Y LA FABRICACIÓN DE PRODUCTOS A PARTIR DEL RECICLAJE DE LLANTAS, DE ACUERDO A LAS DISPOSICIONES NORMADAS DE LOS SISTEMAS DE RECOLECCIÓN SELECTIVA Y GESTIÓN AMBIENTAL DE LLANTAS USADAS EN BOGOTÁ', pp. 1–6.

Oruc, S., Celik, F. and Akpinar, M. V. (2007) 'Effect of cement on emulsified asphalt mixtures', *Journal of Materials Engineering and Performance*, 16(5), pp. 578–583. doi: 10.1007/s11665-007-9095-2.

Pellinen, T. K., Witczak, M. W. and Bonaquist, R. F. (2004) 'Asphalt mix master curve construction using sigmoidal fitting function with non-linear least squares optimization', *Geotechnical Special Publication*, (123), pp. 83–101. doi: 10.1061/40709(257)6.

Pérez, I., Medina, L. and del Val, M. Á. (2013) 'Mechanical properties and behaviour of *in situ* materials which are stabilised with bitumen emulsion', *Road Materials and Pavement Design*, 14(2), pp. 221–238. doi: 10.1080/14680629.2013.779301.

Pettinari, M. *et al.* (2013) 'The use of cryogenic crumb rubber in the cold recycling technique', *Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements - Proceedings of the 2013 Airfield and Highway Pavement Conference*, pp. 1088–1099. doi: 10.1061/9780784413005.091.

Pettinari, M. *et al.* (2014) 'The effect of Cryogenic Crumb Rubber in cold recycled mixes for road pavements', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 63(0), pp. 249–256. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.060>.

Pettinari, M. and Simone, A. (2015) 'Effect of crumb rubber gradation on a rubberized cold recycled mixture for road pavements', *Materials and Design*. Elsevier Ltd, 85, pp. 598–606. doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.139.

Quick, T. and Spencer, W. (2011) 'Early-Age Structural Properties of Base Material Treated with

|

Asphalt Emulsio', *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, pp. 40–50.

Quintero Lemus, L. J. and Gallardo Amaya, R. J. (2015) 'Caracterización mineralógica de arcillas expansivas con fines de estabilización.', *Ingenio UFPSO*, 8, pp. 83–92.

Raposeiras, A. C. *et al.* (2016) 'Effect of copper slag addition on mechanical behavior of asphalt mixes containing reclaimed asphalt pavement', *Construction and Building Materials*, 119, pp. 268–276. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.081.

Reyes-Ortiz, O. *et al.* (2012) 'Evaluation of Hot Mix Asphalt Mixtures with Replacement of Aggregates by Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Material', *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Elsevier B.V., 53, pp. 379–388. doi: 10.1016/j.sbspro.2012.09.889.

Sacramento Country, Bollard & Brennan, I. (1999) 'Report on status of rubberized asphalt traffic noise reductio in Sacramento country.', (November).

Salomon, A. and Newcornb, D. E. (2000) 'A review of cold mix asphalt.pdf'.

Salomon, D. R. (2006) 'Asphalt emulsion technology', *Transportation Research Board, Washington, D.C.*, (August), pp. 1–24. Available at: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec102.pdf>.

Sangiorgi, C. *et al.* (2017) 'A laboratory and filed evaluation of Cold Recycled Mixture for base layer entirely made with Reclaimed Asphalt Pavement', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 138, pp. 232–239. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.004.

Santero, N. J., Masanet, E. and Horvath, A. (2011a) 'Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review', *Resources, Conservation and Recycling*. Elsevier B.V., 55(9–10), pp. 801–809. doi: 10.1016/j.resconrec.2011.03.010.

Santero, N. J., Masanet, E. and Horvath, A. (2011b) 'Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps', *Resources, Conservation and Recycling*. Elsevier B.V., 55(9–10), pp. 810–818. doi: 10.1016/j.resconrec.2011.03.009.

Santos, J. *et al.* (2015) 'A life cycle assessment of in-place recycling and conventional pavement construction and maintenance practices', *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(9), pp. 1199–1217. doi: 10.1080/15732479.2014.945095.

Sebaaly, P. E. *et al.* (2004) 'Performance of Cold In-Place Recycling in Nevada', (1896), pp. 162–169.

Singh, S., Ransinchung, G. D. and Kumar, P. (2017) 'An economical processing technique to improve RAP inclusive concrete properties', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 148, pp. 734–747. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.030.

Skaf, M. *et al.* (2017) 'EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use', *Resources, Conservation and Recycling*. Elsevier B.V., 120, pp. 176–185. doi: 10.1016/j.resconrec.2016.12.009.

Sorlini, S., Sanzeni, A. and Rondi, L. (2012) 'Reuse of steel slag in bituminous paving mixtures', *Journal of Hazardous Materials*. Elsevier B.V., 209–210, pp. 84–91. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.12.066.

|

State of California Department of Transportation (2006) 'Asphalt rubber usage guide', *Materials Engineering and Testing Services*.

Stroup-Gardiner, M. (2011) *NCHRP Synthesis No. 421 Recycling and Reclamation of Asphalt Pavements Using In-Place Methods*. doi: 10.17226/14568.

Tebaldi, G. *et al.* (2014a) 'Synthesis of standards and procedures for specimen preparation and in-field evaluation of cold-recycled asphalt mixtures', 629(March 2016). doi: 10.1080/14680629.2013.866707.

Tebaldi, G. *et al.* (2014b) 'Synthesis of standards and procedures for specimen preparation and in-field evaluation of cold-recycled asphalt mixtures', 629(March 2016). doi: 10.1080/14680629.2013.866707.

Thanaya, I. E. A., Zoorob, S. E. and Forth, J. P. (2009) 'A laboratory study on cold-mix, cold-lay emulsion mixtures', *Proceedings of the ICE - Transport*, (1), pp. 47-55. doi: 10.1680/tran.2009.162.1.47.

Thanaya, I. N. A. (2003a) 'Improving the performance of cold bituminous emulsion mixtures (CBEMs) : incorporating waste', (July). Available at: <http://etheses.whiterose.ac.uk/386/>.

Thanaya, I. N. A. (2003b) 'Improving the performance of cold bituminous emulsion mixtures (CBEMs) : incorporating waste', (July). Available at: <http://etheses.whiterose.ac.uk/386/>.

Thanaya, I. N. A., Negara, I. N. W. and Suarjana, I. P. (2014) 'Properties of Cold Asphalt Emulsion Mixtures (CAEMs) using materials from old road pavement milling', *Procedia Engineering*. Elsevier B.V., 95(Scscm), pp. 479-488. doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.208.

Thenoux, G., González, Á. and Dowling, R. (2007) 'Energy consumption comparison for different asphalt pavements rehabilitation techniques used in Chile', *Resources, Conservation and Recycling*, 49(4), pp. 325-339. doi: 10.1016/j.resconrec.2006.02.005.

Universidad de los Andes (2003) 'Estudio de las Mejoras mecánicas de las mezclas asfálticas con desechos de llantas', p. 63. Available at: http://www.idu.gov.co/web/guest/tramites_documentos?p_p_id=20&p_p_action=1&p_p_state=exclusive&p_p_mode=view&p_p_col_id=&p_p_col_pos=0&p_p_col_count=0&_20_struts_action=/document_library/get_file&_20_folderId=21&_20_name=estudio_de_mezclas_asfalticas2.pdf.

Valdés, G. *et al.* (2011) 'Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP)', *Construction and Building Materials*, 25(3), pp. 1289-1297. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.09.016.

Wirtgen, G. (2004) *Wirtgen Manual de Reciclado en Frío*.

Wirtgen Group (2012) 'Wirtgen Cold Recycling Technology', p. 367.

Xiao, F. (2014) 'Laboratory investigation of dimensional changes of crumb rubber reacting with asphalt binder Laboratory Investigation of Dimensional Changes of Crumb Rubber Reacting with Asphalt Binder', (January 2006).

Xiao, F., Putman, B. J. and Amirkhanian, S. N. (2006) 'Laboratory investigation of dimensional changes of crumb rubber reacting with asphalt binder', *Proceeding Asphalt Rubber 2006*

Conference, 82(76.4), p. 71.

Xiao, J. and Yu, Y. (2011) 'Research on Moisture Susceptibility of Emulsion Treated Cold Reclaimed Asphalt Mixture', *Pavements and Materials*, (212 GSP), pp. 45–52. doi: 10.1061/47623(402)6.

Yan, J. *et al.* (2014) 'Investigation and Prediction Model for the Dynamic Modulus of Asphalt Emulsion Cold Recycled Mixtures', *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(1), p. 4014113. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001048.

Yan, J. *et al.* (2014) 'The theoretical analysis of the RAP aged asphalt influence on the performance of asphalt emulsion cold recycled mixes', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 71, pp. 444–450. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.002.

10. Anexos

10.1. Tablas Anovas- Gravedad específica máxima

ANOVA Gmm 3,2% de emulsión mezclas con caucho						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,0068	3	0,002266667	27,2	0,000150703	4,066180551
Dentro de los grupos	0,000666667	8	8,33333E-05			
Total	0,007466667	11				

ANOVA 3,45% de emulsión mezclas con caucho						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,015758333	3	0,005252778	78,79166667	2,78913E-06	4,066180551
Dentro de los grupos	0,000533333	8	6,66667E-05			
Total	0,016291667	11				

ANOVA Gmm mezclas con calamina						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,0006	2	0,0003	9	0,015625	5,14325285
Dentro de los grupos	0,0002	6	3,33333E-05			
Total	0,0008	8				

10.1.1. Gravedad específica bulk - compactación Marshall

ANOVA 3,2% de emulsión mezclas con caucho - Marshall

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,0015	3	0,0005	2,727272727	0,114059	4,0661806
Dentro de los grupos	0,0014667	8	0,0001833			
Total	0,0029667	11				

ANOVA 3,45% de emulsión mezclas con caucho - Marshall

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,002025	3	0,000675	3,681818182	0,0623465	4,0661806
Dentro de los grupos	0,0014667	8	0,0001833			
Total	0,0034917	11				

10.1.2. Gravedad específica bulk - compactación Giratoria

ANOVA 3,2% de emulsión mezclas con caucho - Giratorio

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,0025	3	0,000833333	11,11111111	0,0031743	4,0661806
Dentro de los grupos	0,0006	8	7,5E-05			
Total	0,0031	11				

ANOVA 3,45% de emulsión mezclas con caucho - Giratorio

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,0015333	3	0,000511111	7,666666667	0,0097197	4,0661806
Dentro de los grupos	0,0005333	8	6,6667E-05			
Total	0,0020667	11				

10.1.3. Densidad versus número de giros para las diferentes mezclas compactadas en Compactador Giratorio

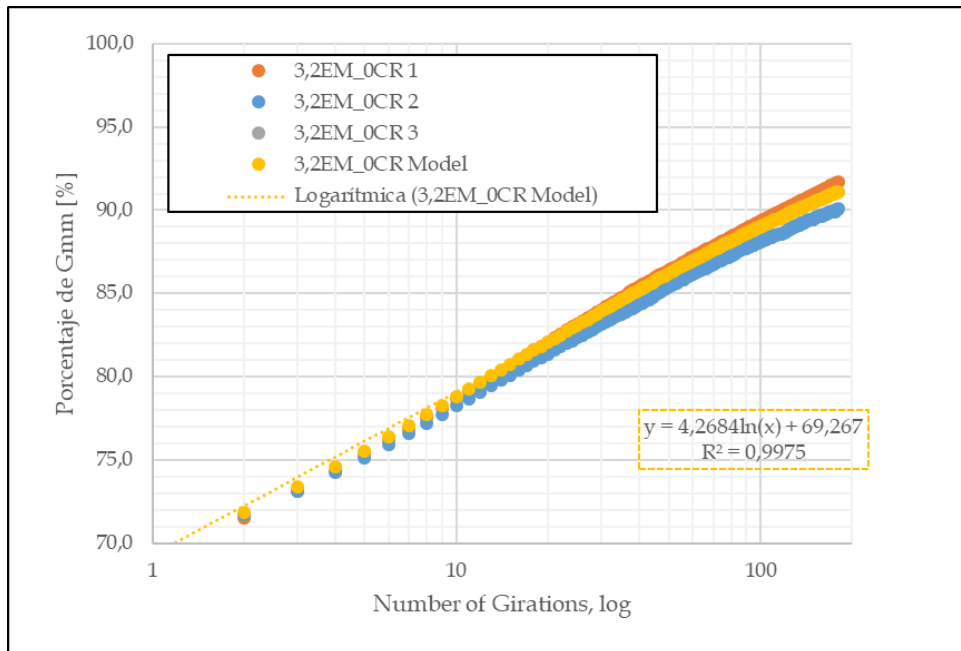


Fig 10-1. Densidad versus número de giros para la mezcla 3,2EM_0CR

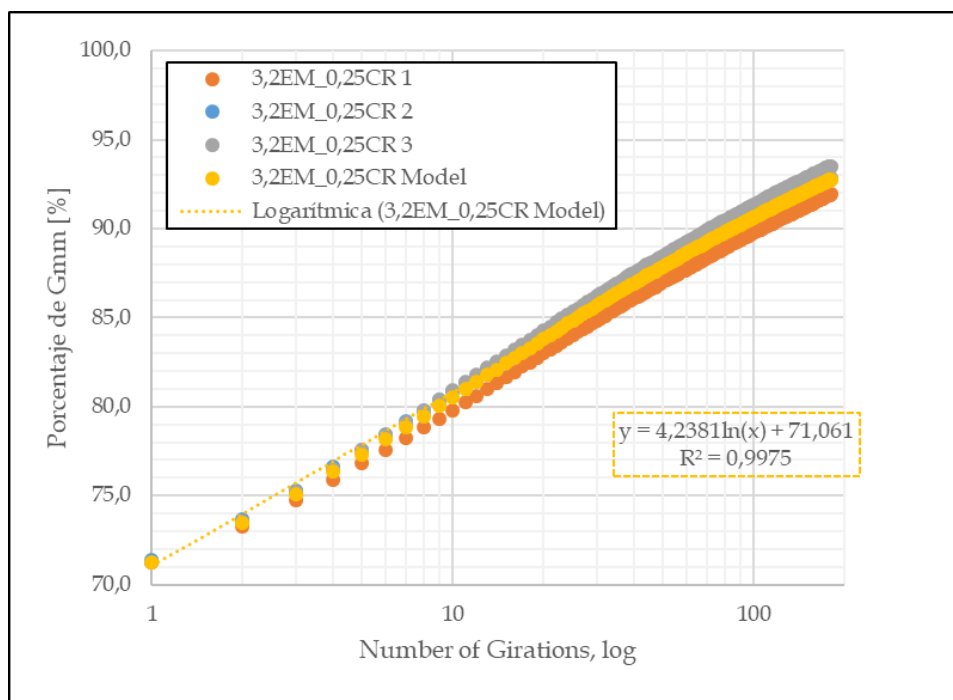


Fig 10-2. Densidad versus número de giros para la mezcla 3,2EM_0,25CR

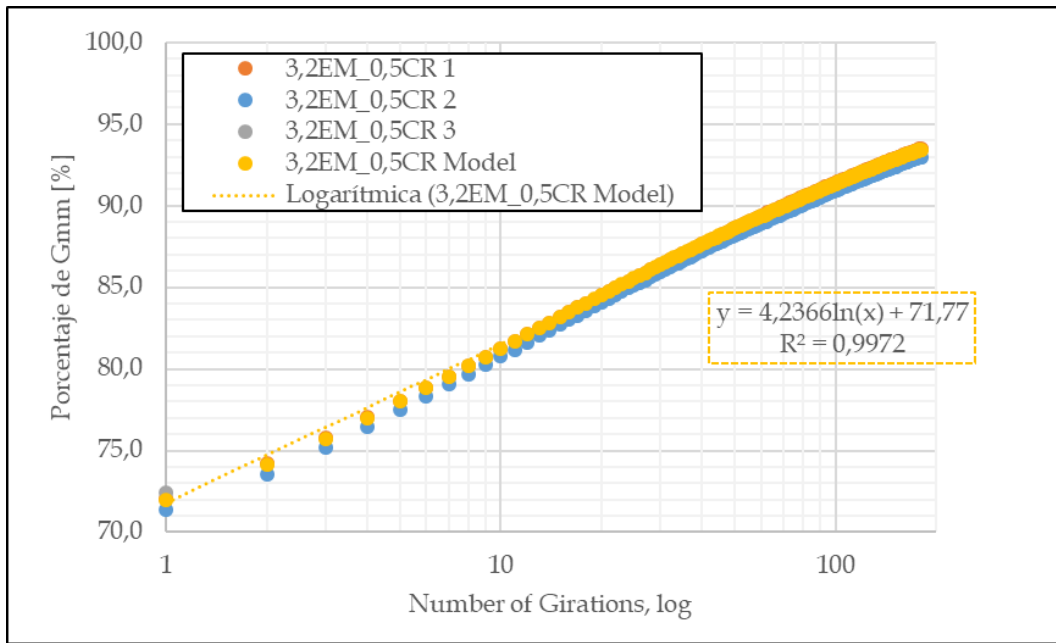


Fig 10-3. Densidad versus número de giros para la mezcla 3,2EM_0,50CR

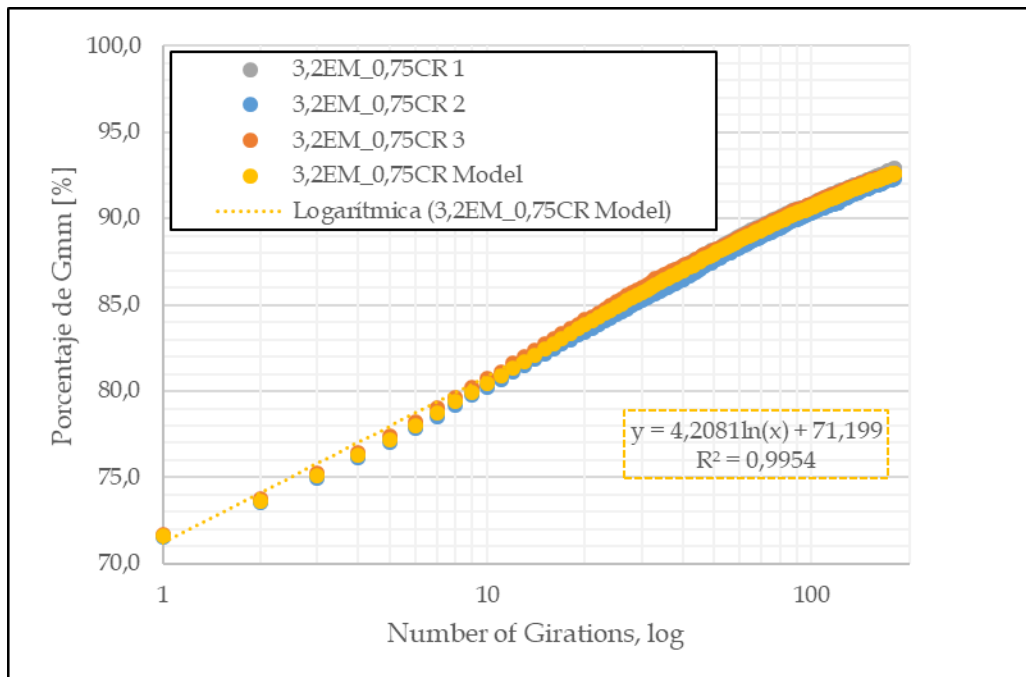


Fig 10-4. Densidad versus número de giros para la mezcla 3,2EM_0,75CR

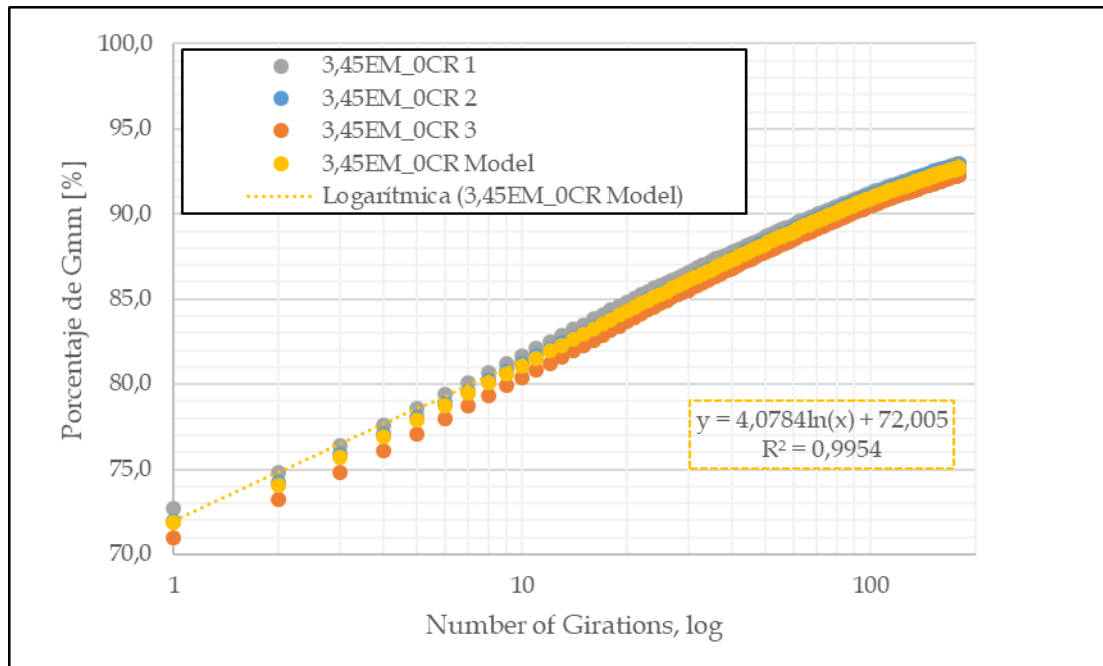


Fig 10-5. Densidad versus número de giros para la mezcla 3,45EM_0CR

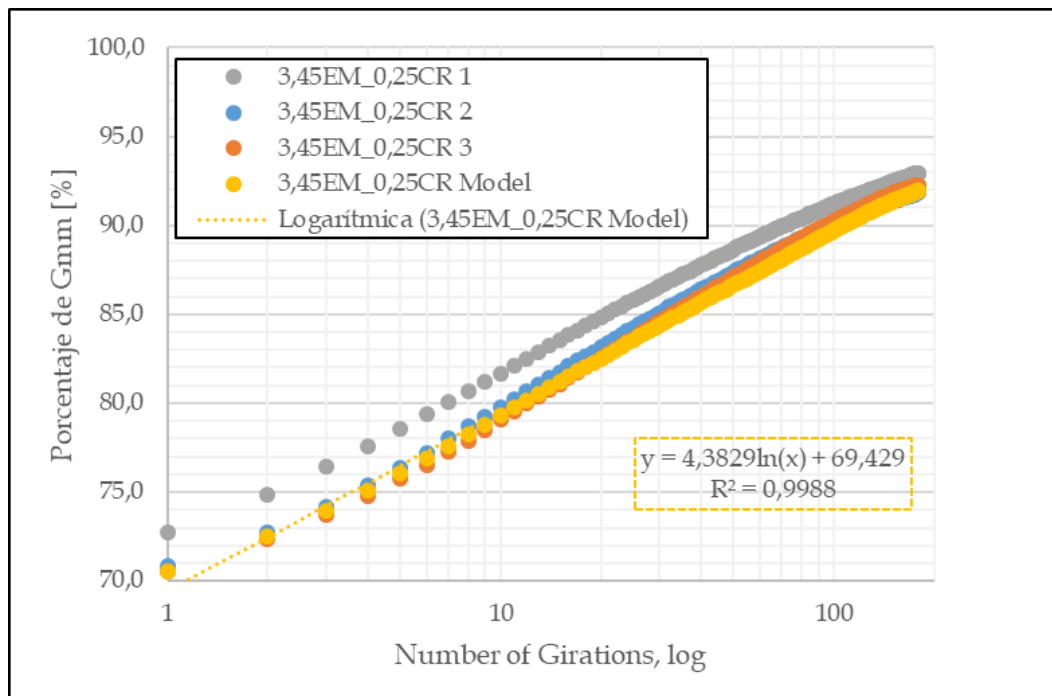


Fig 10-6. Densidad versus número de giros para la mezcla 3,45EM_0,25CR

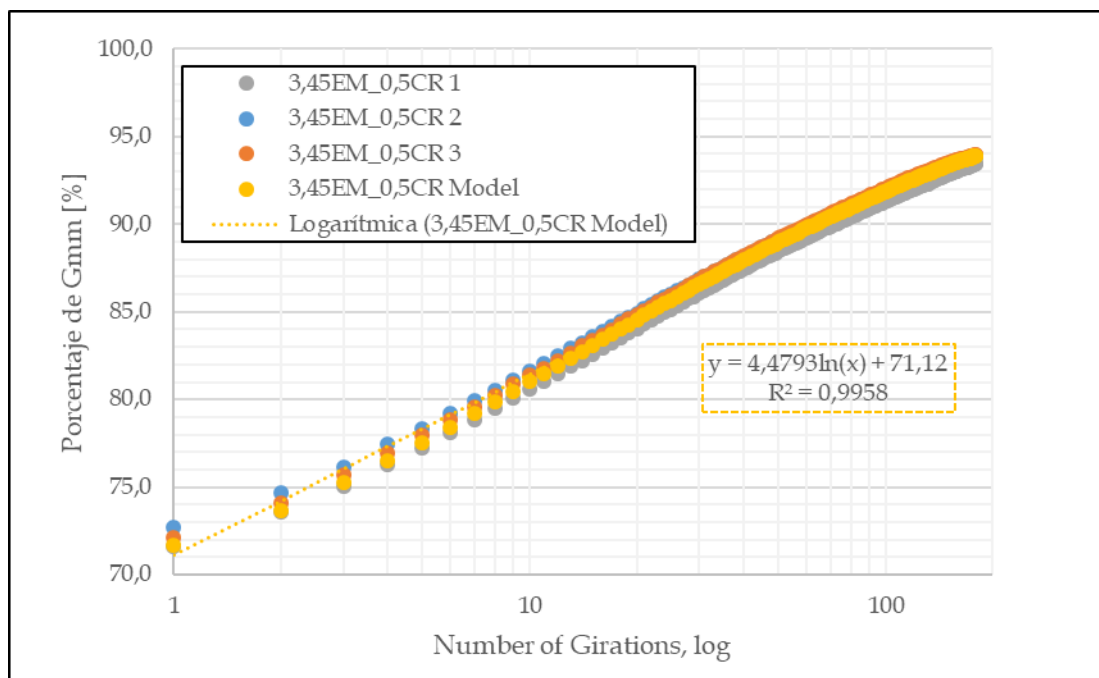


Fig 10-7. Densidad versus número de giros para la mezcla 3,45EM_0,5CR

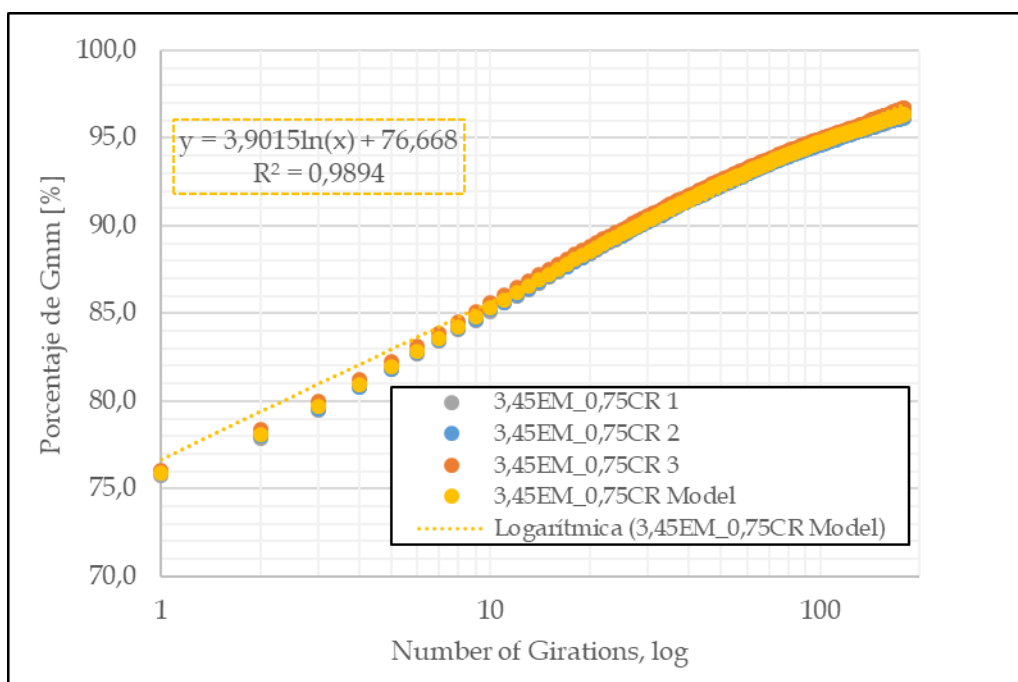


Fig 10-8. Densidad versus número de giros para la mezcla 3,45EM_0,75CR

10.2. Ficha Técnica de la emulsión utilizada. Fuente MPI Ltda.

 Manufacturas y Procesos Industriales Ltda. <small>Desarrollando las mejores soluciones</small>	R DT 10	MANUAL DE PROCEDIMIENTOS E INSTRUCTIVOS			
	N.R: 10 2014-10-17	REPORTE DE ENSAYO DE EMULSIONES ASFALTICAS CONVENCIONALES			

Tipo de emulsión:	MPI CRL-1	Fecha despacho:	N.A	Despacho No.	N.A
Cliente:	UNIVERSIDAD DEL NORTE	Fecha informe:	03/10/2015		
O b r a :	N.A	Lote No:	N.A		

PROPIEDAD	Norma Referencia	Especificación		Reporte de control de calidad	Frecuencia de ensayo
		MIN	MAX		
VISCOSIDAD: SAYBOLT-FURROL a 25°C. (s) a 50°C. (s)	INV E-763	20	200	28	LOTE
CONTENIDO DE AGUA, %	INV E-761	—	43	38,5	LOTE
ESTABILIDAD DURANTE ALMACENAMIENTO (24 HORAS) %	INV E-764	—	1	N.A	LOTE
SEDIMENTACION A LOS 5 DIAS %	INV E-764	—	5	1,9	LOTE
CONTENIDO DE ASFALTO POR DESTILACION HASTA 260°C, % del peso por dif.	INV E-762	57	—	61,5	LOTE
CONTENIDO DE SOLVENTES POR DESTILACION	—	—	—	0,0	—
TAMIZADO: RETENIDO EN TAMEZ No. 20, (%)	INV E-765	—	0,1	0,00072	LOTE
CARGA DE LA PARTICULA	INV E-767	—	POSITIVA	POSITIVA	LOTE
p.H	INV E-768	—	6	2,63	LOTE
ENSAYOS AL RESIDUO DE LA DESTILACION					
PENETRACION @ 25°C, 100 g, 5s (mm/10)	INV E-706	60	100	65	LOTE
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO (%)	INV E-713	97,5	—	98,42	SEMESTRAL
DUCTILIDAD @ 25°C, 5cm/min (cm)	INV E-702	40	—	97,5	ANUAL

ING. LAB. 

(1). La sedimentación a los cinco días se considera no aplicable (N.A) cuando el producto va a ser empleado en pocos días en obra, en caso contrario, para almacenamiento prolongado (>5 días) se recomienda recircular la emulsión en el tanque quincenalmente.

(2). Algunas emulsiones especialmente superestables (CRL-1h), presentan una sedimentación a los 5 días mayor al 5% debido principalmente a su alta formulación, pero teniendo en cuenta que son empleadas en obra en pocos días no se presenta ningún problema para la estabilidad del producto. Por ser un proceso reversible, se recomienda recircular la emulsión.

Fig 10-9. Emulsión asfáltica utilizada en la investigación. Fuente: MPI Ltda.

10.3. Ficha Técnica Calamina

 Ternium	FICHA TÉCNICA SUBPRODUCTO		Fecha elaboración:	
	CALAMINA		16/03/2015 REV.1	
1. IDENTIFICACIÓN DEL RESIDUO Y EMPRESA QUE GENERA				
EMPRESA GENERADORA: FERRASA SAS		CONSULTAS DE EMERGENCIAS		
TELÉFONO: 3797511-8133		CONTACTO FERRASA:	PRODUCCIÓN MONTERÍA	
NOMBRE DE RESIDUO: Calamina, laminilla de hierro, óxido de hierro, mill scale, Sólido fino homogéneo granular de color gris, rojo o negro, sin olor. Se genera en el proceso de trefilado, enderezado, figurado y entorchado.		TELÉFONO:	3797511-8133	
SUSTANCIA NO PELIGROSA		DEFENSA CIVIL:	144	
2. COMPOSICIÓN Y CONSTITUYENTES				
CONCENTRACIONES	Hierro	420mg/L Fe		
	Calcio	58 mg/L Ca		
	Manganeso	16,8 mg/L Mg		
3. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS				
CLASIFICACIÓN	PICTOGRAMA	ROMBO NFPA		
No aplica	No aplica	Inflamabilidad	0	Riesgo específico
		Reactividad	0	
		Salud	0	No Aplica
4. MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS				
Inhalación: Se debe realizar lavado de fosas nasales				
Ingestión: Lavar con abundante agua				
Contacto con la piel: Lavarse la piel con abundante agua				
Contacto con los ojos: Realizar lavado ocular				
5. MEDIOS Y MEDIDAS PARA COMBATIR EL FUEGO, INCENDIOS				
Esta sustancias no es inflamable ni combustible, por lo cual no tiene riesgo de fuego o incendio.				
6. MEDIDAS PARA CONTROLAR DERRAMES, FUGAS				
Zonas de Evacuación: Acordonar el área, no permitir el paso de personal no autorizado				
Precauciones para el Medio Ambiente: No verter en alcantarillas ni en suelos, previniendo contaminación del área				
Métodos de Limpieza: Usar pala para la recolección del derrame.				
Equipamiento mínimo del transportista: Pala para recolección y sacos en buen estado.				
7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO				
Almacenamiento: Se recomienda no almacenar a la intemperie para evitar degradación de Bigbags				
Manipulación: No sobrepasar los 25 kg de cargue por persona, usar medios mecánicos para maniobras con sacos mayores a 25 Kg.				
8. ELEMENTOS DE PROTECCIÓN				
Protección Respiratoria: Usar mascarilla de polvos, cuando se manipule el material				
Protección para las manos: Usar Guantes para evitar el contacto con la piel.				
Protección de la vista: Usar gafas para evitar proyecciones de calamina hacia los ojos				
Protección para la piel: Usar uniforme manga larga				

10.4. Módulos de Rigidez en mezclas con Caucho. Compactación Marshall

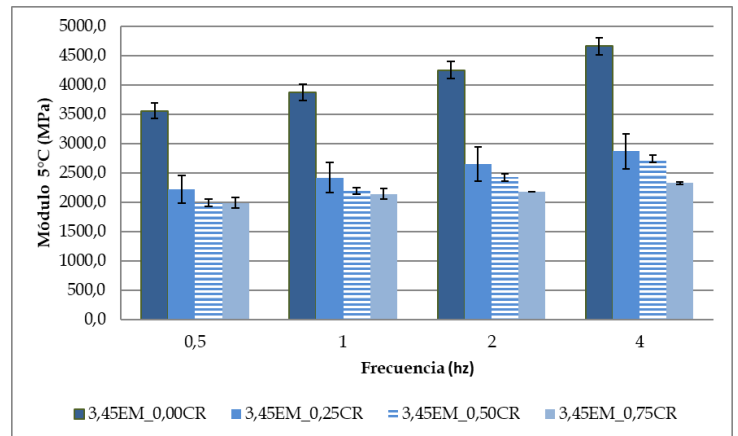
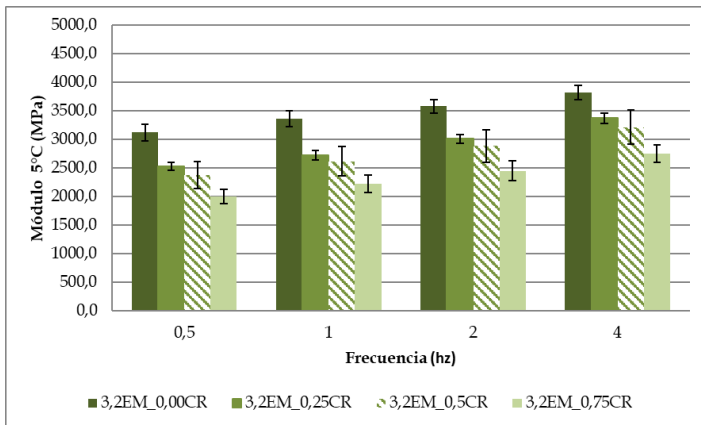


Fig 10-10. Módulo de Rigidez a 5°C para distintos porcentajes de Caucho con 3,2% de emulsión fabricados por compactación Marshall.

Fig 10-11. Módulo de Rigidez a 5°C para distintos porcentajes de Caucho con 3,45% de emulsión fabricados por compactación Marshall.

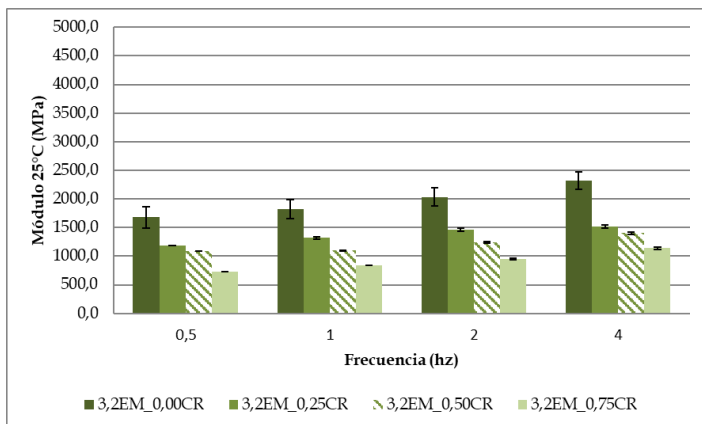


Fig 10-12. Módulo de Rigidez a 25°C para distintos porcentajes de Caucho con 3,2% de emulsión fabricados por compactación Marshall.

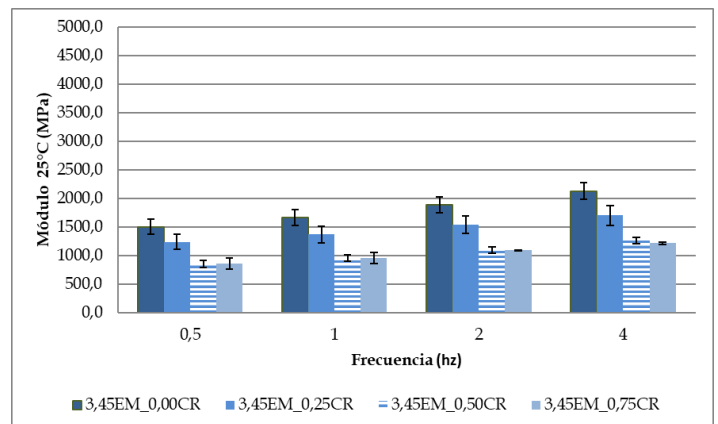


Fig 10-13. Módulo de Rigidez a 25°C para distintos porcentajes de Caucho con 3,45% de emulsión fabricados por compactación Marshall.

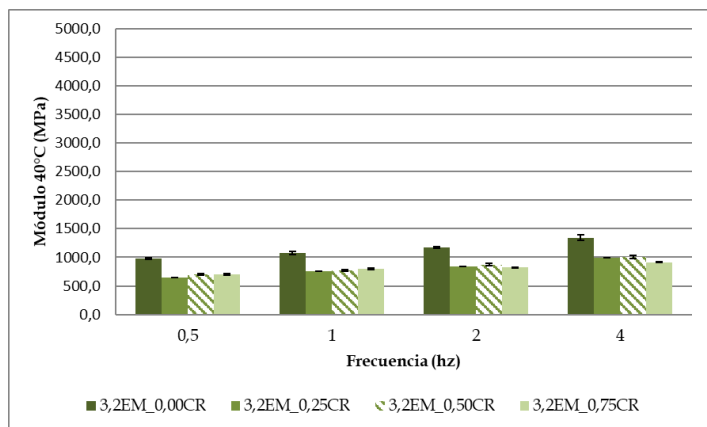


Fig 10-14. Módulo de Rigidez a 40°C para distintos porcentajes de caucho con 3,2% de emulsión fabricados por compactación Marshall.

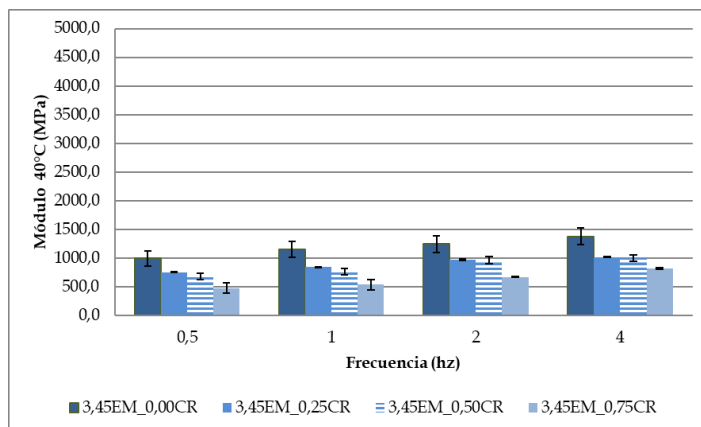


Fig 10-15. Módulo de Rigidez a 40°C para distintos porcentajes de caucho con 3,45% de emulsión fabricados por compactación Marshall.

10.5. Módulos de Rigidez en mezclas con Caucho. Compactación Giratoria

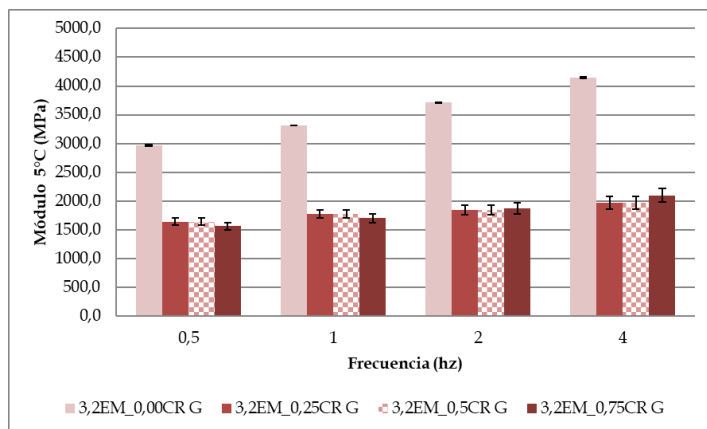


Fig 10-16. Módulo de Rigidez a 5°C para distintos porcentajes de Caucho con 3,2% de emulsión fabricados por compactación Giratoria.

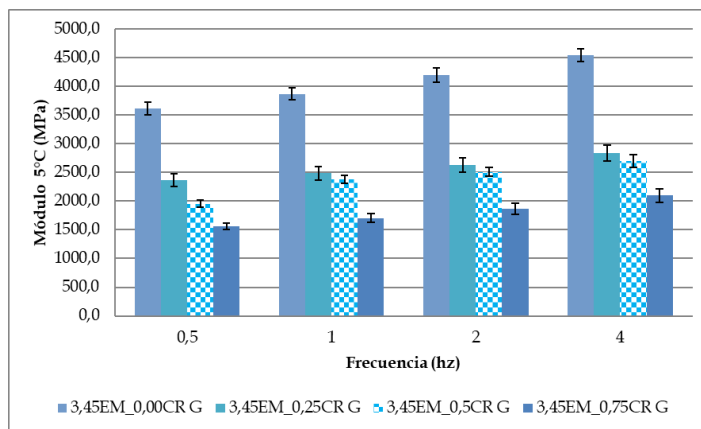


Fig 10-17. Módulo de Rigidez a 5°C para distintos porcentajes de Caucho con 3,45% de emulsión fabricados por compactación Giratoria.

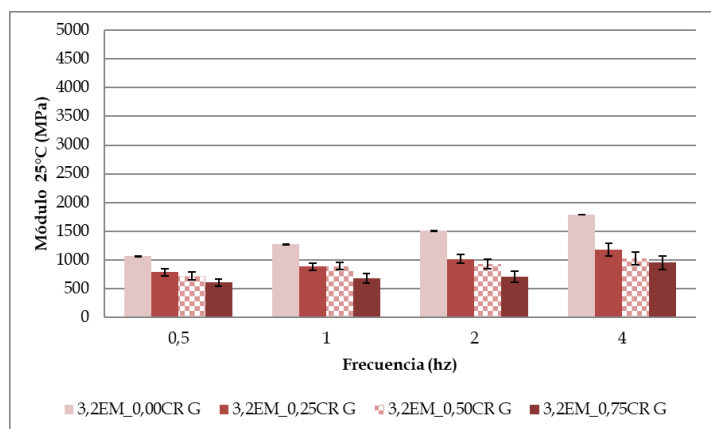


Fig 10-18. Módulo de Rigidez a 25°C para distintos porcentajes de Caucho con 3,2% de emulsión fabricados por compactación Giratoria.

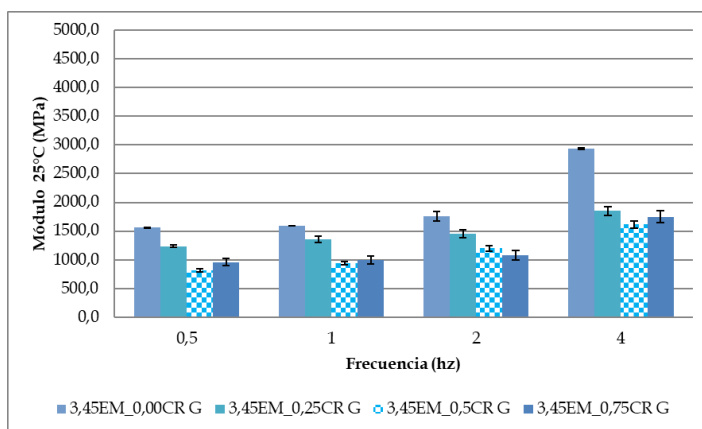


Fig 10-19. Módulo de Rigidez a 25°C para distintos porcentajes de Caucho con 3,45% de emulsión fabricados por compactación Giratoria.

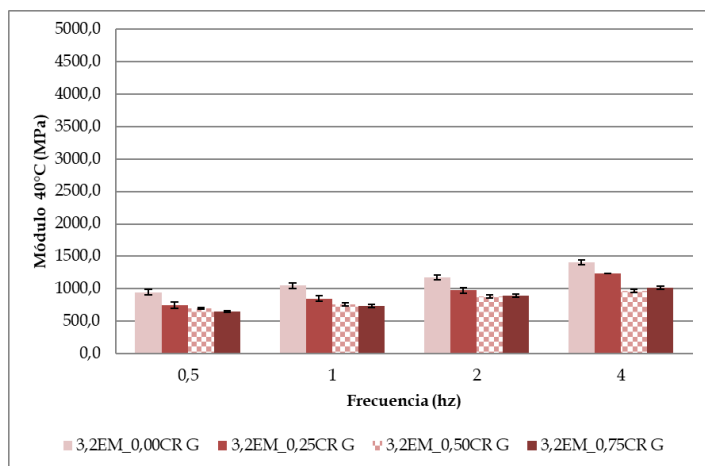


Fig 10-20. Módulo de Rigidez a 40°C para distintos porcentajes de caucho con 3,2% de emulsión fabricados por compactación Giratoria.

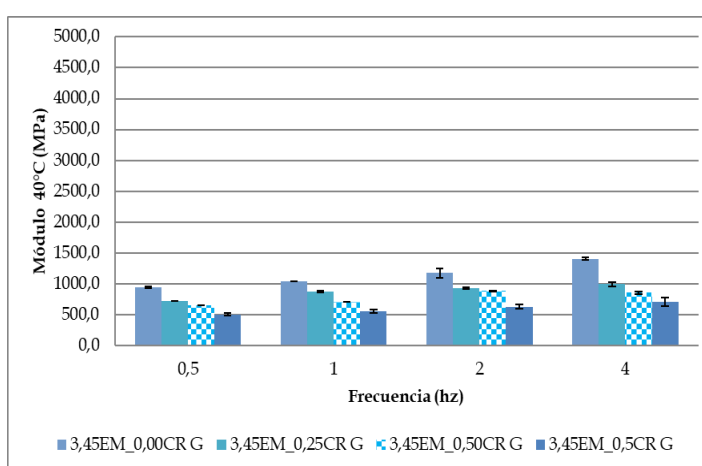


Fig 10-21. Módulo de Rigidez a 40°C para distintos porcentajes de caucho con 3,45% de emulsión fabricados por compactación Giratoria.

10.6. Módulos de Rigidez en mezclas con Calamina.

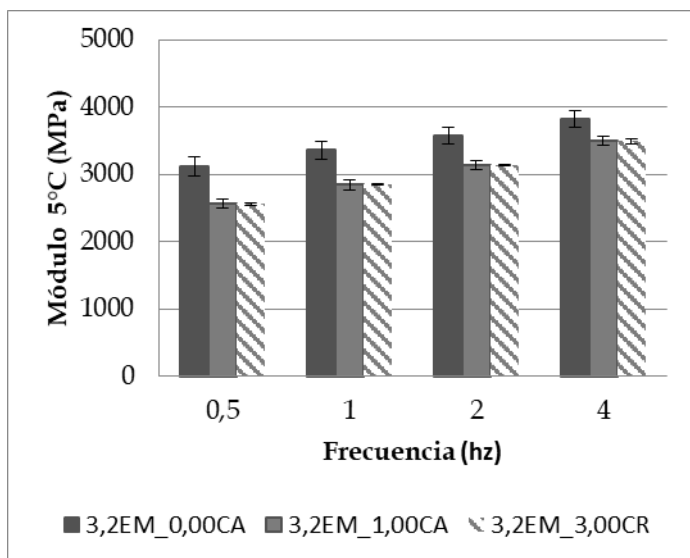


Fig 10-22. Módulo de Rigidez a 5°C para distintos porcentajes de Calamina con 3,2% de emulsión fabricados por compactación Marshall.

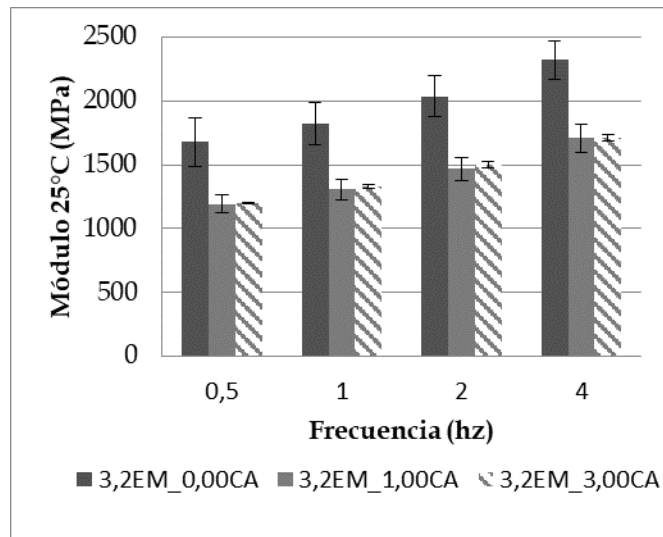


Fig 10-23. Módulo de Rigidez a 25°C para distintos porcentajes de Calamina con 3,2% de emulsión fabricados por compactación Marshall.

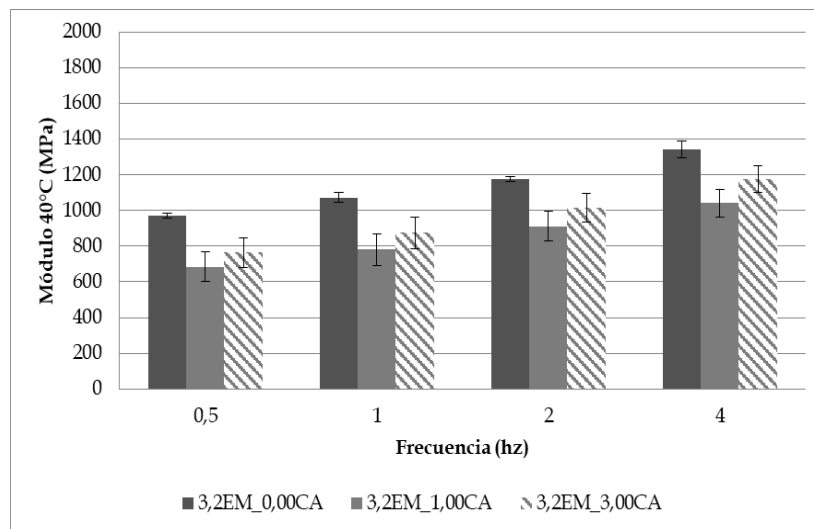


Fig 10-24. Módulo de Rigidez a 40°C para distintos porcentajes de Calamina con 3,2% de emulsión fabricados por compactación Marshall.

10.7. Resultados Ensayo de Creep De rigidez De rigidez

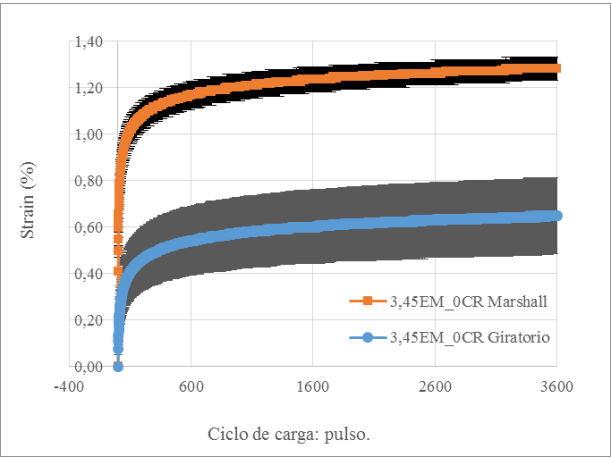


Fig 10-16. Curva de Creep para mezcla control con 3,45% de emulsión. Compactación Marshall vs Giratoria.

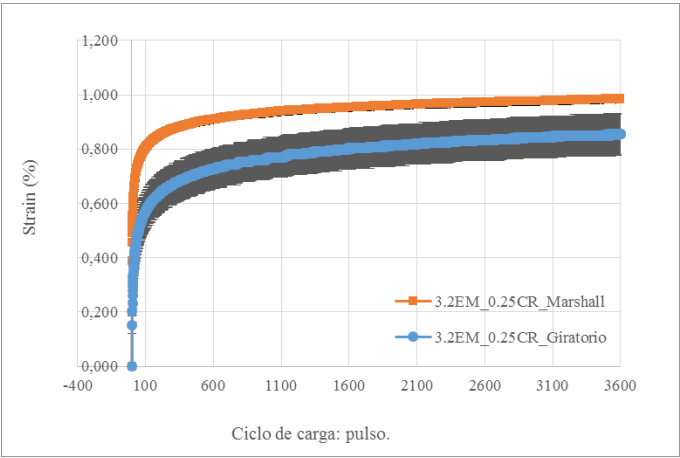


Fig 0-1. Curva de Creep para mezcla control con 3,2% de emulsión y 0,25% de CR. Compactación Marshall vs Giratoria

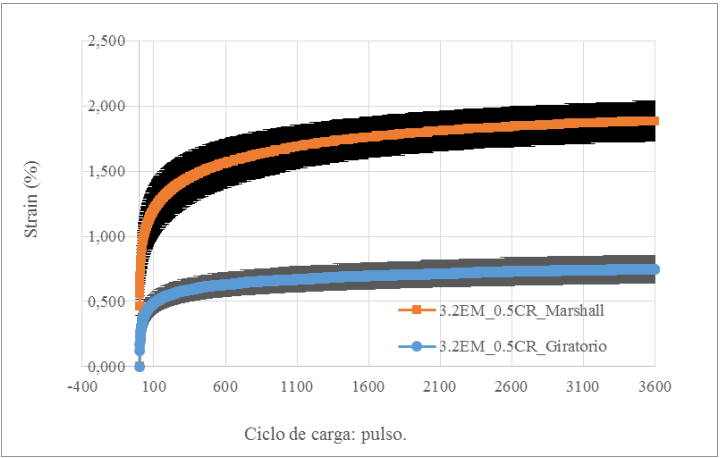


Fig 0-1. Curva de Creep para mezcla control con 3,2% de emulsión y 0,25% de CR. Compactación Marshall vs Giratoria.

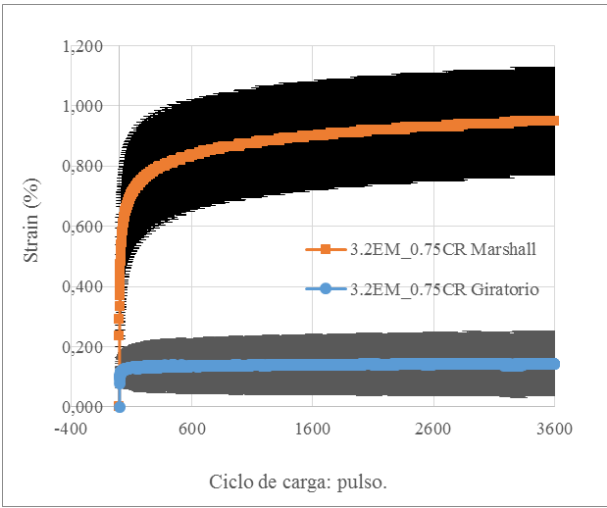


Fig 0-1. Curva de Creep para mezcla control con 3,2% de emulsión y 0,5% de CR. Compactación Marshall vs Giratoria.

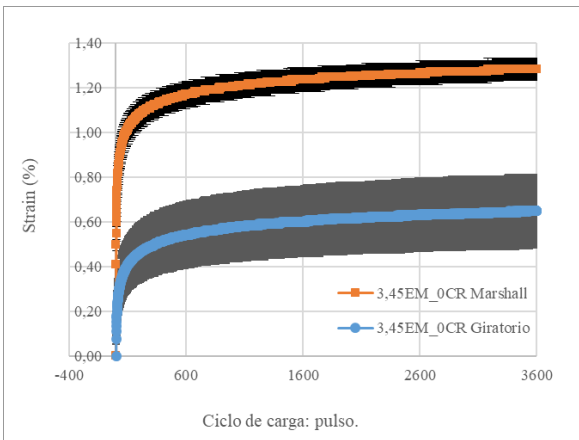


Fig 0-2. Curva de Creep para mezcla control con 3,45% de emulsión y 0% de CR. Compactación Marshall vs Giratoria

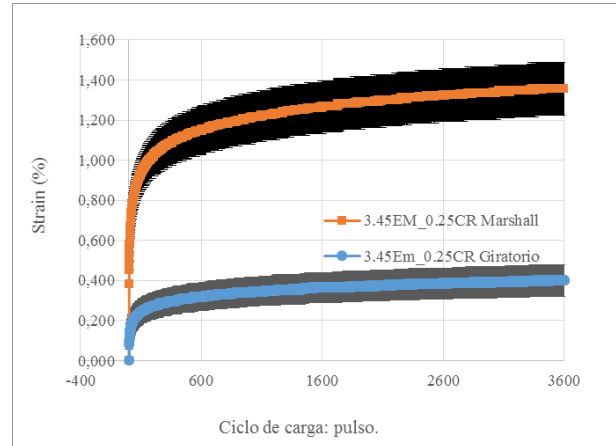


Fig 0-3. Curva de Creep para mezcla control con 3,45% de emulsión y 0,25% de CR. Compactación Marshall vs Giratoria

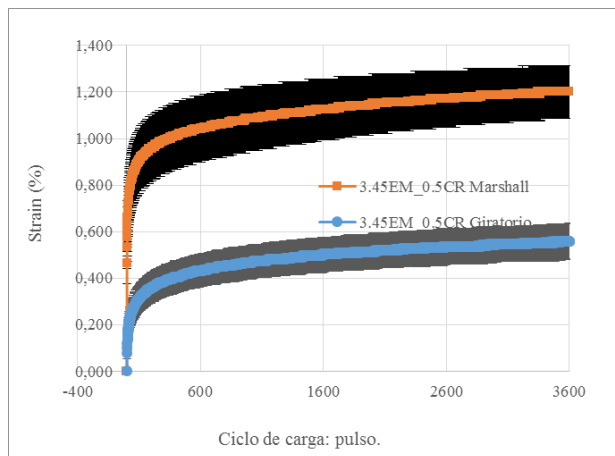


Fig 0-4. Curva de Creep para mezcla control con 3,45% de emulsión y 0,5% de CR. Compactación Marshall vs Giratoria

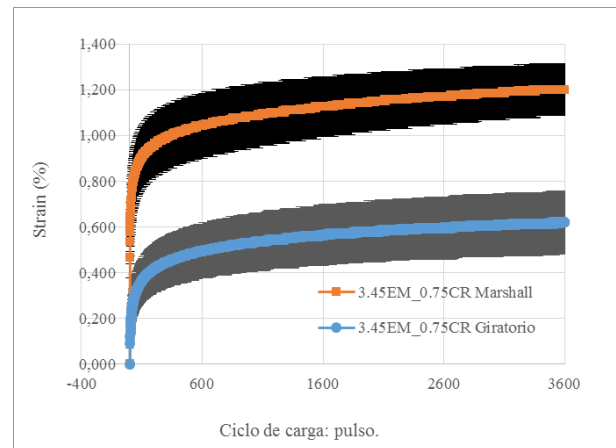


Fig 0-5. Curva de Creep para mezcla control con 3,45% de emulsión y 0,75% de CR. Compactación Marshall vs Giratoria